

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Vliv obsahu vzduchu na hydraulický ráz

Influence of Air Content on Water Hammer

Student:

Adamec Radek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student:

Radek Adamec

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Vliv obsahu vzduchu na hydraulický ráz
Influence of Air Content on Water Hammer

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie neustáleného proudění kapalin stlačitelných kapalin s modulem pružnosti závislým na obsahu vzduchu a hydraulického rázu.
2. Přehled měřidel obsahu vzduchu.
3. Zpracování metodiky měření obsahu vzduchu, cejchování měřidla.
4. Návrh obvodu pro měření hydraulického rázu s měřidlem obsahu vzduchu, realizace obvodu, měření tlaku v závislosti na obsahu vzduchu, porovnání výsledků.
5. Grafické zpracování výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 s. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.

DRÁBKOVÁ, S. et al. *Cvičení z mechaniky tekutin*. Skriptum. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2002. 138 s. ISBN 80-248-0039-X. Dostupné z www: <<http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>>

BOJKO, M. et al. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. Ostrava: VŠB Ostrava 2007. 182 s. ISBN 80-86634-53-1.

MILLER, D., S. *Internal Flow System*. BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5.

KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM).

KOZUBKOVÁ, M. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Monografie. 1. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 130 stran. ISBN 978-80-248-2043-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jana Rautová, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

Kozubková

doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



Farana

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta: Ratibořská 1/31
747 23 Bolatice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ADAMEC, R. *Vliv obsahu vzduchu na hydraulický ráz : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2010, 58s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Bakalářská práce se zabývá změnou hydraulického rázu při různém množství vzduchu. V úvodní kapitole je popsána definice hydraulického rázu a jeho možné využití. V další, teoretické části bakalářské práce je vysvětlen princip měření obsahu vzduchu elektrochemickou a fluorescenční metodou. Laboratorním měřením byly zjištěny průběhy tlaků v čase při hydraulickém rázu jak pro odstátou, tak pro provzdušněnou nádrž. Následně byla vypočtena skutečná rychlost zvuku a při hydraulickém rázu pro oba způsoby měření.

ANNOTATION OF BACHLOR THESIS

ADAMEC, R. *Influence of Air Content on Water Hammer : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2010, 58s. Thesis head: Kozubková, M.

The thesis is dealing with the change of water hammer under different amount of air. In the introductory chapter, there is the definition of the water hammer and its utilization. In the next theoretical part of the thesis, there is the explanation of the way of the measurement of the air content by electrochemical and fluorescence method. Through the laboratory measurement the processes of the pressure during the time during the water hammer were found for the water tank without the air and for the water tank with the air. Then, the real speed of the sound a during the water hammer for the both ways of measurement was calculated.

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	8
SEZNAM ZNAČENÍ VE SCHÉMATU OBVODU	9
1 ÚVOD.....	10
2 HYDRAULICKÝ RÁZ.....	11
2.1 Definice hydraulického rázu.....	11
2.2 Příčiny, následky a omezení hydraulického rázu	12
2.3 Průběh hydraulického rázu.....	14
2.4 Využití hydraulického rázu	16
3 OBSAH VZDUCHU V KAPALINÁCH	18
3.1 Výskyt vzduchu v kapalinách.....	18
3.1.1 Průtokoměry dvoufázových směsí kapalin	19
3.1.2 Kavitace	20
3.2 Stlačitelnost kapalin	21
3.3 Určení modulu pružnosti kapaliny.....	22
3.4 Rozpuštěný vzduch v kapalině	23
3.5 Nerozpuštěný vzduch v kapalině	24
4 MĚŘENÍ OBSAHU VZDUCHU	28
4.1 Měřič obsahu vzduchu	29
4.1.1 Cejchování měřiče obsahu vzduchu	30
4.2 Moderní měřiče obsahu vzduchu	30
4.2.1 Elektrochemické měření vzduchu v kapalině	31
4.2.2 Optické měření kyslíku fluorescenční metodou.....	32
4.2.3 Porovnání obou způsobů měření rozpuštěného kyslíku	34
4.2.4 Možné způsoby montáže	36
5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ	37
5.1 Renovace obvodu k měření hydraulického rázu.....	37
5.2 Návrh schématu a popis měřicího zařízení	39
5.3 Specifikace a popis měřících prvků	40
5.4 Postup měření	47
5.5 Grafy průběhu tlaků	49
5.6 Určení periody a výpočet rychlosti tlakové vlny	50
6 ZÁVĚR.....	52
7 LITERATURA.....	53
PŘÍLOHA.....	55

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

a	rychlost zvuku	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
a_t	teoretická rychlost zvuku v kapalině	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
c_p	měrná tepelná kapacita tlaková	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_v	měrná tepelná kapacita objemová	$[\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
d	průměr potrubí	$[\text{mm}]$
k	součinitel zahrnující vliv pružných def.	$[1]$
k	absorpční součinitel	$[1]$
l	délka potrubí	$[\text{m}]$
n	polytropický exponent	$[1]$
p_a	atmosférický tlak	$[\text{Pa}]$
p_1	vstupní tlak	$[\text{Pa}]$
p_2	konečný tlak	$[\text{Pa}]$
Δp	rozdíl tlaků	$[\text{Pa}]$
s	tloušťka stěny potrubí	$[\text{mm}]$
t_z	doba uzavírání ventilu	$[\text{s}]$
E	modul pružnosti materiálu potrubí	$[\text{Pa}]$
K	modul objemové pružnosti kapaliny	$[\text{Pa}]$
T	doba běhu vlny	$[\text{s}]$
V	celkový objem směsi	$[\text{m}^3]$
V_k	objem kapaliny	$[\text{m}^3]$
V_g	objem plynu v kapalině při daném ref. tlaku	$[\text{m}^3]$
V_{vr}	objem rozpuštěného vzduchu v kapalině	$[\text{m}^3]$
α	relativní obsah plynu v kapalině	$[1]$
ε	dielektrická permitivita	$[1]$
ρ	hustota kapaliny	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$

SEZNAM ZNAČENÍ VE SCHÉMATU OBVODU

N	nádrž
HG	čerpadlo
H	hadice
MS	měřicí sonda pro měření obsahu vzduchu COS 61 - A1F0
K	kabel
P	převodník pro měření obsahu vzduchu COM 253
UP	ultrazvukový průtokoměr
V	uzavírací ventil
PC	počítač

1 ÚVOD

Hydraulika je technická disciplína zabývající se využitím mechanických vlastností tekutin. Teoretické základy hydrauliky vycházejí z mechaniky tekutin. Hydraulika studuje rovnováhu i pohyb tekutin a jejich vzájemné působení. Její velkou výhodou je přenos velkých sil, a proto se využívá ve všech odvětvích průmyslu.

Značným problémem hydrauliky je hydraulický ráz. Všechny systémy, ve kterých protéká kapalina potrubím při změně průtoku, mohou zaznamenat tlakové pulzace a vznikají také tlakové vlny. Tyto vlny mohou způsobit značné poškození instalací. Proto je důležitá studie hydraulického rázu, předpokládání jeho vzniku a možných následků. Následky můžeme zmírnit vhodným navržením světlosti potrubí DN nebo pomalým zavíráním ventilů. Na tyto faktory musíme při navrhování hydraulických systémů dávat zřetel.

Obsah vzduchu v kapalině ovlivňuje hydraulický ráz. Cílem této práce je experimentálně změřit skutečný obsah vzduchu v odstáté kapalině (malý obsah vzduchu) a kapalině napuštěné do nádrže (větší obsah vzduchu) a pokusit se porovnat jejich vliv na hydraulický ráz. V závěru zhodnotím dosažené experimentální výsledky s teoretickými poznatky.

2 HYDRAULICKÝ RÁZ

2.1 Definice hydraulického rázu

Při velkých změnách tlaku musíme počítat se stlačitelností kapaliny a neustálé proudění kapaliny řešíme jako hydraulický ráz. Tento ráz vzniká přeměnou kinetické energie kapaliny v deformační práci kapaliny. Tato práce se projeví ve formě tlakových vln, které by se periodicky opakovaly u ideální kapaliny. U skutečné kapaliny naopak vlivem vnitřního tření postupně zaniknou [1].

Tyto tlakové vlny mohou způsobit nenapravitelné poškození instalací, a proto je jejich studie důležitá. Přetlaky, které nám vznikají v hydraulických obvodech, mnohdy nejsou pro samotné prvky nebezpečné. Větším problémem jsou až samotné odrazové (tlakové) vlny, které se odráží v různých bodech systému, zapříčiní kolísání tlaku a mohou rezonovat. S tímto problémem se běžně setkáváme ve vodních elektrárnách, při špatném návrhu potrubí, čerpadel anebo nevhodně zvoleném ventilu [2].

Při odvozování hydraulického rázu budeme předpokládat, že nádrž je dostatečně velká a je k ní připojeno potrubí obr. 2.1. Hladina kapaliny v nádrži se nám nebude měnit a na konci potrubí máme připojený uzavírací ventil. U použité kapaliny známe modul objemové pružnosti K a u potrubí modul pružnosti v tahu E .

Při náhlém uzavření ventilu zastavíme výtok kapaliny. Dojde k přeměně kinetické energie na deformační práci, která vzniká stlačením kapalinového sloupce. U takto stlačené kapaliny se nám zvýší tlak o Δp . Tlaková vlna se šíří od uzavřeného ventilu rychlostí zvuku a . Po uplynutí času $t = \frac{l}{a}$ se dostane potrubím až k nádrži a doba, kterou potřebuje k vrácení do místa svého vzniku, bude: $T = 2t = \frac{2la}{a}$. (2.1)



Obr. 2.1 Zjednodušené schéma obvodu pro hydraulický ráz [4]

K totálnímu hydraulickému rázu dojde jen tehdy, pokud doba uzavírání ventilu t_z bude kratší než doba běhu vlny T : $t_z \leq T$, až v tomto případě se veškerá kinetická energie přemění na deformační. Změnu tlaku Δp při totálním hydraulickém rázu odvodil Žukovskij v roce 1898: $\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$ (2.2)

- kde a je skutečná rychlost zvuku určená vztahem:

$$a = k \cdot a_t = k \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.3)$$

- k je součinitel zahrnující vliv pružných deformací potrubí, který se určí ze vztahů:

- *tenkostěnné potrubí*: $k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Kd}{Es}}} \quad (2.4)$

- *tlustostěnné potrubí*: $k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E}{K} \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2}}} \quad D = d + 2 \cdot s \quad (2.5)$

- kde: K [Pa] modul objemové pružnosti kapaliny
 E [Pa] modul pružnosti materiálu potrubí
 d [mm] průměr potrubí
 s [mm] tloušťka stěny potrubí

Částečný hydraulický ráz nastane tehdy, pokud doba uzavírání ventilu t_z bude delší než doba běhu vlny T : $t_z > T$. Jestliže se rychlost kapaliny lineárně mění v čase, změnu tlaku určíme vztahem $\Delta p_{\xi} = \Delta p \frac{T}{t_z}$. V případě totálního hydraulického rázu tedy můžeme zaznamenat větší stoupnutí tlaku [3].

2.2 Příčiny, následky a omezení hydraulického rázu

Příčin hydraulického rázu je mnoho a jeho následky jsou často katastrofální. Proto je znalost možných omezení hydraulického rázu důležitá. Jestliže počítáme s hydraulickým rázem při návrhu systémů a dokážeme jej částečně omezit, můžeme zamezit jeho následkům a prodloužit životnost prvků v systému.

➤ Příčiny, které vedou ke vzniku tlakových vln [2] :

- uzavírání a otevírání ventilů
- odstavení nebo najetí čerpadel a turbín
- napouštění nebo vypouštění potrubí
- výběr čerpadla
- kolísání tlaku v systému
- chemické reakce a tepelné změny
- mechanické vibrace systému nebo jejich komponentů
- průtočně dynamické vibrace

Kontrola pulzací tlaků vzniklých tlakovými rázy je velmi důležitá v hydraulických okruzích. Vysoké tlaky mohou způsobit poškození prvků systému jako je například prasknutí filtrů nebo potrubí, únava materiálu, kavitace, poškození materiálu a celou řadu dalších problémů [2].

Kontrola a omezení tlakových vln je stejně důležitá jako jejich předvídání. Podle určitých charakteristik systémů se dělí na tyto způsoby [2]:

➤ omezení vzniku hydraulického rázu:

- prodloužení doby otevírání a zavírání ventilů
- zvýšení setrvačnosti čerpacího zařízení či turbíny
- vyloučení průtokových – dynamických vibrací a možných rezonancí

➤ snížení přetlaků pomocí prvků jako jsou:

- vyrovnávací sloupce (komíny)
- nádrže vzduchu
- akumulární jímky
- ventily přívodu vzduchu
- výtlačné ventily
- systém by-passu
- napájecí nádrže
- tlakové vlny

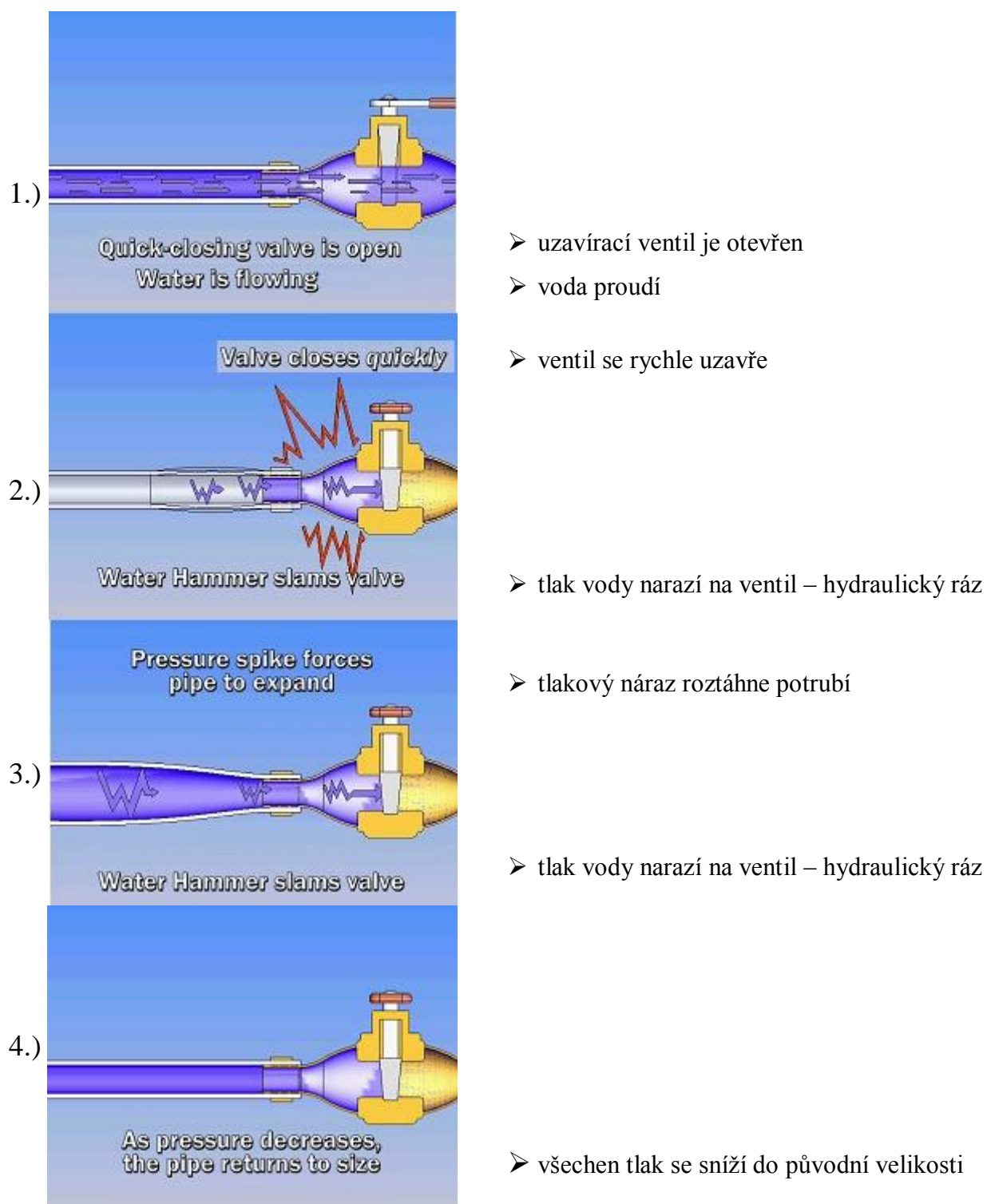
K docílení co největšího omezení hydraulického rázu je zapotřebí omezit pulsace ihned na počátku. Musíme předvídat přibližné rychlosti kapalin v potrubí [m/s] a navrhnout jejich průměr DN, což je v praxi běžné při projektování bazénů. Dále musíme zajistit pomalé otevírání a zavírání ventilů. Dalším důležitým faktorem je zabezpečit velkou setrvačnost při odstavování a najíždění čerpacích agregátů [2].

➤ možné způsoby omezení také jsou [2] :

- zavírání ventilů: pro velikost tlakového rázu je důležitá doba uzavírání ventilu. Jestliže je doba uzavírání ventilu příliš krátká, pak jsou tlakové vlny vysoké. Proto musí být ve skutečnosti doba uzavírání ventilu několikanásobně delší. V praxi se dlouhé zavírání ventilů může řešit více rychlostmi uzavírání, první část zavírání je rychlá a druhá je pomalá.
- zvýšení setrvačnosti čerpadla: opět jde o snížení tlakového rázu, který vzniká zastavením čerpadla. Prodloužením doby doběhu při odstavení čerpadla a odpojením napájení motoru získáme snížení tlakového rázu a větší setrvačnost. V praxi se můžeme setkat i se zapojením setrvačnicku, což je omezeno na určité případy.

2.3 Průběh hydraulického rázu

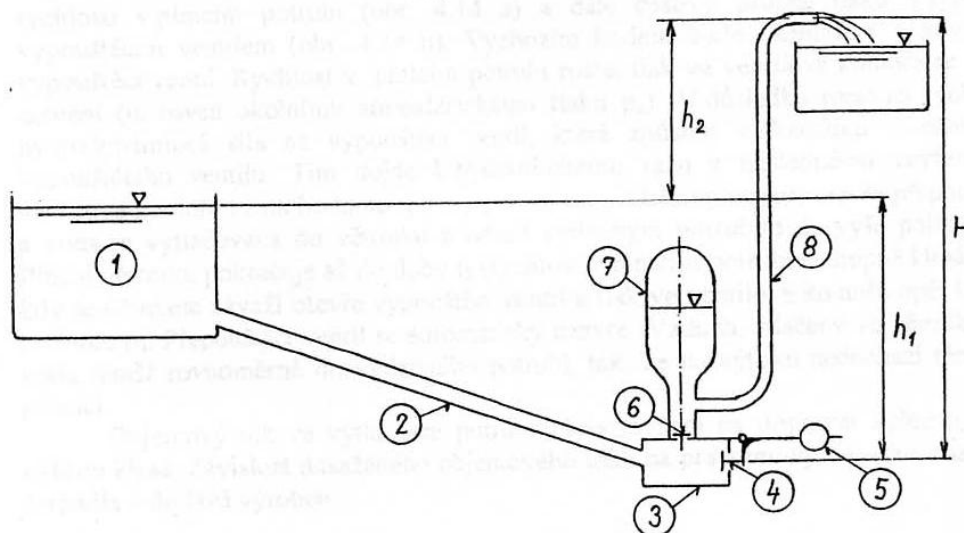
V praxi je důležitá simulace dějů probíhajících v kapalinových systémech. Na obrázku 2.2 je názorně zobrazen průběh hydraulického rázu v plastové trubce při rychlém uzavření ventilu. Je zjevné, že stoupnutí tlaku vzniklé tlakovým rázem vody na uzavírací ventil se projeví roztáhnutím plastového potrubí, které může vlivem velkého přepětí dokonce prasknout.



Obr. 2.2 Hydraulický ráz v plastovém potrubí [4]

2.4 Využití hydraulického rázu

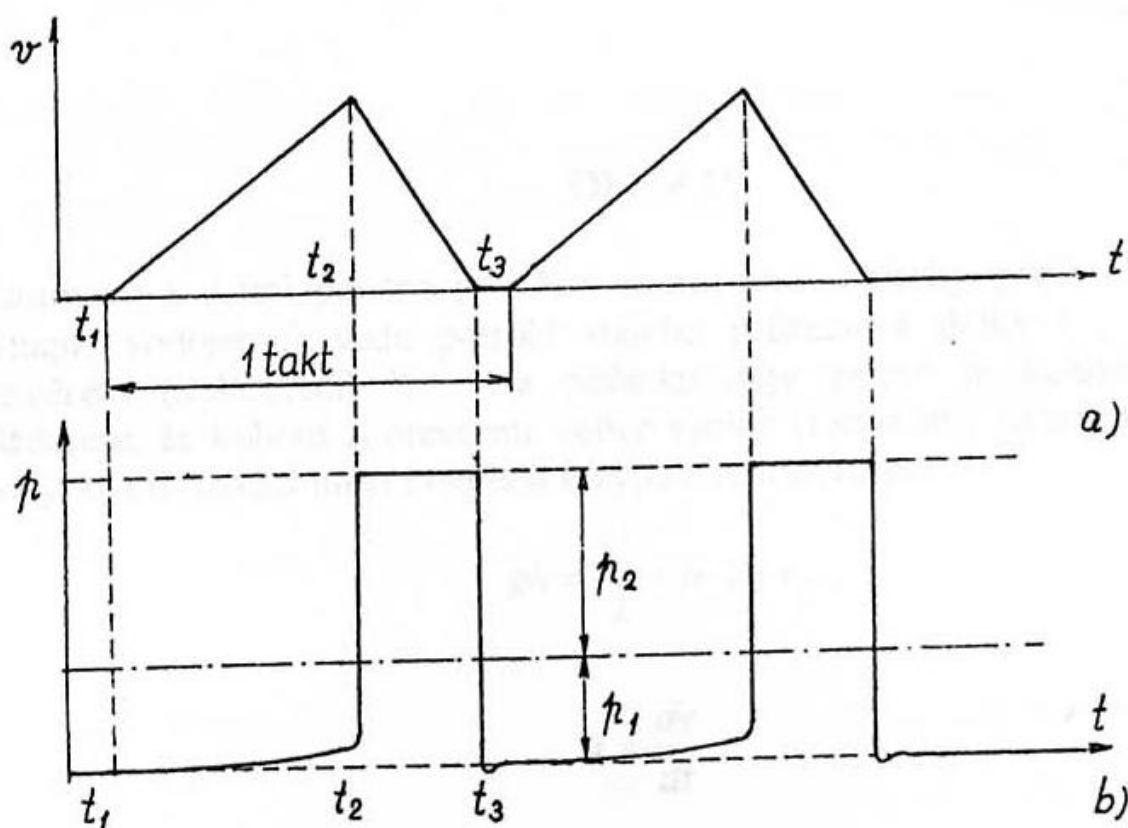
Nebezpečí vycházející z hydraulického rázu je tolik, že se jeho využití zdá nemožné. I široká veřejnost považovala v 18. století bádání Josefa Montgolera (vynálezce balónů) nad trkacími ventily za absurdní. V roce 1780 však sestavil Montgoler jednoduché čerpadlo, tzv. vodní trkač, které dokázalo přeměnit hydraulický ráz na užitečnou práci. Do českých zemí byl první trkač dovezen roku 1834 a sloužil pro dopravu vody z říčky Mohelky na zámek Sychrov. V minulosti byl vodní trkač hodně rozšířený, hlavně v zemědělských usedlostech. Postupem času jeho využití vlivem elektroinstalací zcela vymizelo. Dnes při stále se zvyšujících cenách elektřiny můžeme trkač doporučit, a to i proto, že náklady na provoz jsou nízké a můžeme jej použít i v místech, kde není zaveden elektrický proud [5] [6].



Obr. 2.2 Schéma vodního trkače [6]

- 1) nádrž
- 2) plnicí potrubí
- 3) ventilová komora
- 4) vypouštěcí ventil (trkací)
- 5) závaží
- 6) přepouštěcí ventil
- 7) větrník
- 8) výtlačné potrubí

Voda je umístěna v nádrži 1. Dále protéká plnicím potrubím 2, až do ventilové komory trkače 3. Vypouštěcí ventil (trkací) 4 slouží k uzavírání ventilové komory a je zatížen závažím 5 tak, aby byl překonán hydrostatický tlak vody, který vytvoří silový účinek na dvojzvrtné páce a otevře vypouštěcí ventil. Voda začne vytékat a její rychlost se bude zvyšovat až do té doby, kdy vlivem zvyšujícího se odporu strhne talířek do sedla vypouštěcího ventilu a tím jej uzavře. Vzniká hydraulický ráz. Nárůst tlaku otevře přepouštěcí ventil 6 a začne plnit větrník 7. Stlačený vzduch ve větrníku tlačí vodu výtlačným potrubím 8 a ta vytéká ve výšce h_2 . Po zaniknutí hydraulického rázu se snížením tlaku uzavře přepouštěcí ventil, vypouštěcí ventil se vlivem hydrostatického tlaku vody opět otevře a cyklus se periodicky opakuje. Na konci potrubí vytéká voda s malým kolísáním tlaku, takže nedochází skoro k žádným pulsacím [4] [5].



Obr. 2.3 [6]

- a) rychlost vody v plnicím potrubí závislá na čase
- b) časový průběh tlaku před vypouštěcím ventilem

Na obrázku 2.3a můžeme vidět změnu rychlosti vody závislou na čase v plnicím potrubí. Průběh tlaku před vypouštěcím ventilem závislý na čase znázorňuje obrázek 2.3b. Vypouštěcí ventil se začne otevírat v čase t_1 . Se zvětšujícím se časem narůstá rychlost v plnicím potrubí, naopak tlak ve ventilové komoře se skoro nemění – dosahuje velikosti atmosférického tlaku p_a . V čase t_2 naroste hydrodynamická síla vlivem zvyšující se rychlosti tak, že se uzavře vypouštěcí ventil. Vzniká hydraulický ráz a zvýší se tlak o velikost součtu tlaků $p_1 + p_2$. Vlivem rázu se otevře přepouštěcí ventil, do větrníku proudí voda z ventilové komory a dále ji z větrníku vytlačuje vzduch výtlačným potrubím do požadované výšky h_2 . Rychlost plnění větrníku trvá po dobu t_3 . Po uplynutí tohoto času se přepouštěcí ventil uzavře a závaží otevře vypouštěcí ventil. Tlak ve ventilové komoře se ustálí znovu na hodnotě p_a [5].

3 OBSAH VZDUCHU V KAPALINÁCH

3.1 Výskyt vzduchu v kapalinách

Ve všech kapalinách se vyskytuje určitý obsah vzduchu, a to ve dvou variantách. Vzduch tvoří s kapalinou směs kapalina – vzduch a může se vyskytnout ve stavu rozpuštěném nebo nerozpuštěném. Vlivem obsahu vzduchu v kapalině je kapalina stlačitelná, míru stlačitelnosti nám udává modul pružnosti. Vlivem stlačení kapaliny a jejího následného dynamického proudění vzniká hydraulický ráz, který je podrobně popsán v kapitole 2 [6].

Vyloučení vzniku bublin v kapalinách je prakticky nemožné. Vznikají různými netěsnostmi v systémech (potrubí k čerpadlům), uvolněním plynů z kapalin ve ventilech, tryskách a turbínách. Vznik bublin můžeme částečně omezit vysokými tlaky kapalin v potrubí, anebo pomocí odvzdušňovacích zařízení, tzv. separátorů plynů [6] [8].

Vzduch obsažený v hydraulických olejích má nežádoucí účinky, způsobuje stárnutí oleje a snížení pevnosti mazací vrstvy oleje. Důležitá je dobrá odlučitelnost vzduchu a omezení nebo úplné vyloučení vzniku pěny. To se u hydraulického obvodu částečně zajistí umístěním přepážek a sít do nádrže.

Míru stárnutí oleje nám udává oxidační stálost (termodynamická). Faktory, které ovlivňují stárnutí olejů jsou: vliv účinku kyslíku, teplo, světlo a různé chemické látky.

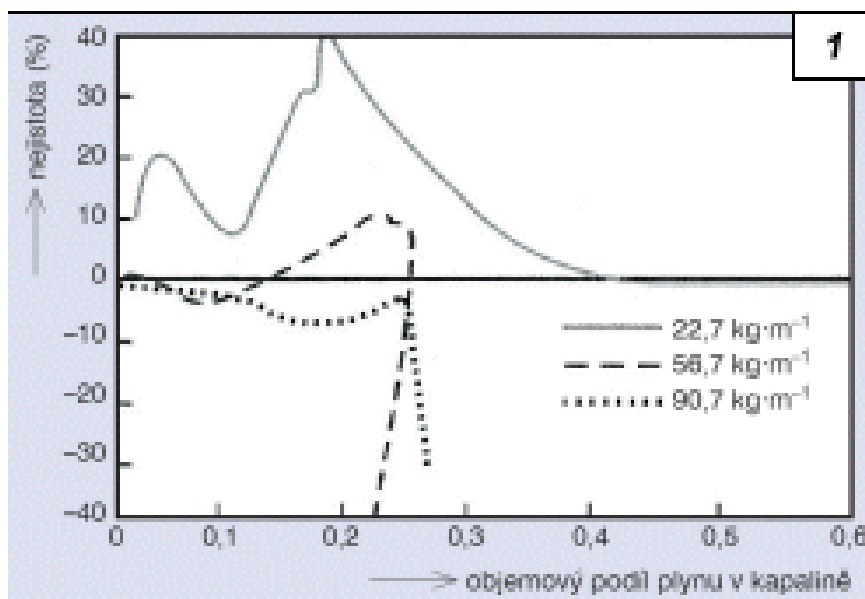
Oxidační stálost vzniká oxidací oleje, což znamená, že se kyslík váže na řetězcové uhlovodíky a mění chemické vlastnosti a složení oleje. Touto oxidací se vytvoří kyselé látky, olejový kal, lepkavé a mazlavé látky a za vysokých teplot mohou vzniknout i asfaltové látky, jejichž vlastnosti mohou být plastické až tvrdé. V případě neodstranění těchto nepříznivých faktorů může v mnohých případech dojít až k zalepení filtrů, ventilů a rozvaděčů. Rychlost oxidace je při nízkých teplotách (do 70 °C) poměrně stálá. Literatura udává, že při každém zvýšení teploty o 10 °C nad 70 °C se vlivem oxidace rychlost stárnutí oleje zdvojnásobí, tato vlastnost je nepříznivá a je důležité zamezit vysokým teplotám u olejů v hydraulických systémech [10].

Na základě mnoha studií a experimentů vznikla tzv. bublinková teorie, podle které je velikost reakční síly vzniklé pohybem bublin úměrná třetí mocnině rozměru bubliny b a kinematické viskozitě kapaliny. Proto je účinek reakční síly u kapalin s malou viskozitou téměř trojnásobný oproti kapalině s velkou viskozitou [9].

3.1.1 Průtokoměry dvoufázových směsí kapalin

Moderní hmotnostní průtokoměry s digitálním pojetím elektronických obvodů dokážou s velkou přesností měřit průtoky kapalin s plynovými bublinami. Tyto Coriolisovy průtokoměry jsou založeny na zákonitosti Coriolisovy síly. Jejich zhotovením se zabývali světoví výrobci na známých výzkumných pracovištích. Tyto průtokoměry umí při dynamických změnách průtoku (dávkování kapalin) přiměřeně brzy reagovat.

Nástup Coriolisových průtokoměrů je takřka revoluční, ale jeho vývoj není z daleka u konce. Další rozvoj bude směřovat k odstranění velkého nárůstu nejistot či naprostého pochybení funkce, vzniklé při měření průtoků dvoufázových směsí kapalina – plyn. Hlavní příčinou tohoto pochybení je plynná složka obsažená v proudící kapalině, která má za následek 90 – 95% všech problémů s těmito průtokoměry. Na obr. 3.1 jsou znázorněny tři křivky o různých rychlostech průtoku vody, přičemž je zřejmé, že při nejmenší hmotnostní rychlosti 22,7 [kg·m⁻¹] a při objemovém podílu vzduchu v kapalině 2% může dosáhnout nejistota až hodnoty 20%. Naopak u největšího hmotnostního průtoku 90,7 [kg·m⁻¹] a objemovém podílu vzduchu v kapalině 2% nepřesáhne hodnota nejistoty 10% hranici [9].



Obr. 3.1 Nejistota údajů Coriolisova průtokoměru v závislosti na podílu vzduchu v kapalině pro vertikální instalaci trubky a pro různé rychlosti průtoků vody [9]

3.1.2 Kavítace

Snížením tlaku proudící kapaliny v systému vznikají dutiny, které mohou být vyplněny plynnou fází (vzduchem) nebo parami protékající kapaliny. Důležitým faktorem je i teplota. Jestliže je použité médium hydraulického systému voda, tak vzniklé dutiny jsou vyplněny vodní párou a hlavní podmínkou vzniku kavítace je pokles tlaku kapaliny pod tlak nasycených par při určité teplotě.

Nepravá kavítace neboli aerace vzniká např. u olejů, u nichž se při podtlaku vylučuje rozpuštěný vzduch a vzniklé dutiny jsou převážně vyplněny vzduchem, ale mohou být vyplněny směsí vzduchu s těkavými uhlovodíky uvolněnými z oleje. Tento případ je nevhodný, jelikož při rychlém stlačení se směs vlivem teploty až 4 000°C vznítí, protože kapalina nedokáže tak velkou teplotu přijmout. Vlivem hoření pak vznikají saze, které nepříznivě ovlivní stárnutí kapaliny a mohou ucpat filtry.

Kapalina s obsahem bublin dále pokračuje do míst s větším tlakem, např. ze sacího potrubí do hydrogenerátoru. Zde jsou bubliny vystaveny velkým tlakům a následným stlačením páry kondenzují. Vlivem difúze se část plynu vstřebá do kapaliny, bubliny se smršťují (implodují). Takto uvolněný prostor se vyplní okolní kapalinou a zbylé plyny jsou

nadále stačovány. Jestliže se setkají stěny deformované bubliny, dochází k velkým rázům, jejichž velikost může dosáhnout až $3 \cdot 10^9 Pa$. K následnému zániku bublin dochází nejčastěji vlivem nerovností povrchu [10].

Kavitační děj provází hluk, který může dosáhnout u čerpadel až 90 dB. Snad největším problémem kavitace je kavitační eroze materiálu, která vzniká oddělováním částic od materiálu. Na materiál působí zpočátku jen povrchové napětí, dále vnikají trhliny a následné oddělování částic je tedy kavitační eroze. Na obr 3.1 je vyfoceno zkavitované oběžné kolo čerpadla [7] [10].



Obr. 3.2 Zkavitované oběžné kolo čerpadla [7]

3.2 Stlačitelnost kapalin

Míru stlačitelnosti kapaliny nám udává modul pružnosti, který ve většině příkladů zanedbáváme a počítáme, že je konstantní, případně stlačitelnost zohledníme snížením výsledku o 10 – 50%. Nevýhodou těchto výpočtů jsou velké nepřesnosti, protože velikost stlačitelnosti jen volíme. Výsledky se od experimentů liší hlavně v dynamických případech [7] [8].

Hlavní definice modulu pružnosti $d\rho = \frac{\rho}{K} dp$ znázorňuje hustotu kapaliny, tj. přesněji [7]:

$$\rho = \rho_{ref} \cdot \left(1 + \frac{p - p_{ref}}{K}\right) \quad (3.1)$$

Zajímavé je posouzení modulu pružnosti pro řešení dynamických úloh hydrauliky pro nízké a vysoké tlaky. Experimenty byly zjištěny různé hodnoty statických a dynamických modulů pružnosti, jejichž podíl odpovídá poměru měrných tepelných kapacit příslušné kapaliny [7]:

$$\triangleright \quad \frac{K_{dyn}}{K_{stat}} = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.2)$$

Prakticky je stanovení statického a dynamického modulu pružnosti velkým problémem.

3.3 Určení modulu pružnosti kapaliny

Je důležité stanovit modul pružnosti kapaliny K_k co nejpřesněji, jelikož významně ovlivňuje výsledek. Zde jsou stanoveny možné metody jeho určení [7]:

- metoda odebírání vzorků
- anemometrie
- fotoelektrické metody
- měření hustoty
- měření rychlosti vzduchu
- **kapacitní metody**

Použitím kapacitní metody pro stanovení modulu pružnosti kapaliny se již v osmdesátých letech zabýval Doc. Ing. J. Kopáček pro výzkumný ústav hydraulických zařízení v Dubnici nad Váhom. Výsledky jeho snažení a princip měření vzduchu v kapalině byly v roce 1986 publikovány v odborném časopise Měřicí technika, který mi sloužil k objasnění tohoto problému, jenž se pokusím dále vysvětlit v kapitole 4 Měřič obsahu vzduchu.

Hlavní definice výpočtu modulu pružnosti kapaliny je přesně určena změnami objemu při změnách tlaku, ale nezahrnuje změnu modulu pružnosti na čase.

Vzduch obsažený v kapalině způsobuje nestabilitu obou fází, a to jak rozpuštěného, tak nerozpuštěného vzduchu v kapalině. Hlavním důvodem nestability jsou opět dynamické jevy v hydraulických zařízeních [7].

3.4 Rozpuštěný vzduch v kapalině

Rozpuštěný vzduch v kapalině vzniká chemickou vazbou atomů kyslíku a dusíku, které se vážou na molekuly oleje. Objemové množství vzduchu se řídí Henryho vztahem [8]:

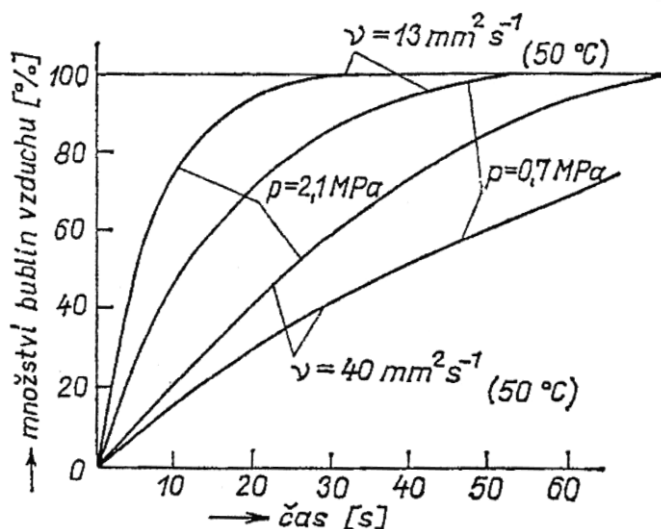
$$\triangleright V_{vr} = V_k \cdot k \cdot \frac{p_2}{p_a} \quad (3.3)$$

- kde:
- V_{vr} objem rozpuštěného vzduchu v kapalině
 - V_k objem kapaliny
 - p_2 konečný tlak
 - p_a atmosférický tlak
 - k absorpční součinitel, pro nehomogenní směs minerální olej – vzduch,
 $k = (0,093 \div 0,11)$

Závislost množství vzduchu na teplotě v rozsahu teplot 20-80 °C můžeme při výpočtech považovat za téměř konstantní. Jestliže tedy nebudeme brát v úvahu změnu teplot, tak při atmosférickém tlaku p_a a teplotě oleje 10 °C dosazených do vzorce 3.3 vyjde objem vzduchu v oleji asi 11%. S narůstajícím tlakem se množství vzduchu lineárně zvyšuje. Jestliže dojde k narušení rovnovážného stavu nasycené kapaliny vzduchem změnou tlaku či teploty, vznikají bubliny vlivem uvolňování molekul vzduchu, čímž vzniká směs kapalina – vzduch. Vzduch se ale také může nadále rozpouštět v kapalině, to bude záviset na velikosti tlaků a teplot v systému. Tento děj je závislý na čase, doba rozpouštění vzduchu v kapalině bude několikanásobná oproti jeho uvolňování a je závislá na třech hlavních faktorech [7] [8]:

- na povrchu styku oleje se vzduchem
- na viskozitě oleje
- na laminárním či turbulentním proudění kapaliny

V čase do 1 sekundy se rozpustí 25-30% vzduchu v oleji. Teorie je taková, že se okamžitě nasytí tenká vrstva oleje vzduchem. Následnou difuzí vzduch z povrchu oleje proniká do jeho hloubky a zvýšení jeho koncentrace potrvá delší dobu [8].



Obr. 3.3 Závislost množství rozpuštěného vzduchu v oleji na viskozitě a čase [8]

Na obrázku 3.3 je znázorněna závislost množství vzduchu v oleji na čase pro rozdílné tlaky a kapaliny s různou viskozitou. Na počátku byl objem rozpuštěného vzduchu v oleji 12% při teplotě 50 °C. Z grafu lze vyčíst, že kapalina s vyšší viskozitou při zatížení různými tlaky p obsahuje v libovolném čase t méně bublin vzduchu oproti kapalině s menší viskozitou při stejném zatížení.

3.5 Nerozpuštěný vzduch v kapalině

Obvykle považujeme kapalinu za vícefázovou homogenní směs kapaliny a vzduchu o malém objemovém množství. Pro tento případ vícefázový model počítá s prouděním kapaliny a vzduchu, přičemž vzduchový podíl je do 12% objemu kapaliny. Hustotu vypočteme na základě směsi pro vícefázový model. Při vysokých tlacích je v kapalině nepatrný obsah vzduchu a v podstatě nemá vliv na modul pružnosti. Pak modul pružnosti čisté kapaliny bez vzduchu vypočteme vztahem [7]:

$$\triangleright K_k = -V_k \cdot \frac{dp}{dV_k} \quad (3.4)$$

kde: - K_k modul pružnosti čisté kapaliny
- V_k objem kapaliny

Při obsazení vzduchu v kapalině se modul pružnosti směsi vypočte dle vztahu [7]:

$$\text{➤} \quad K_k = -V \cdot \frac{dp}{dV} \quad (3.5)$$

kde: $V = V_k + V_g$ objem směsi
- V_g objem plynu v kapalině při daném referenčním tlaku

Ze stavové rovnice vyjádříme objem plynu V_g při tlaku p [7]:

$$\text{➤} \quad p_{ref} \cdot V_{gref}^n = p \cdot V_g^n \Leftrightarrow V_g = V_{gref} \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.6)$$

kde: - n polytropický exponent, pro vzduch $n = 1,4$
- p_{ref}, V_{gref} tyto hodnoty tlaku a objemu jsou dány

Pojmenujeme-li relativní obsah plynu (objemový zlomek) α dostaneme vztah [7]:

$$\text{➤} \quad \alpha = \frac{V_{gref}}{V_k} \quad (3.7)$$

Objemový zlomek závislý na aktuálním tlaku a je dán vztahem [7]:

$$\text{➤} \quad \alpha_p = \alpha \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.8)$$

- tento objemový zlomek s rostoucím tlakem klesá, a to od hodnoty objemového zlomku vzduchu při atmosférickém tlaku až k nule

Upravením vztahu 3.8 dostaneme vztah [7]:

$$\text{➤} \quad \frac{\alpha_p}{\alpha} = \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.9)$$

Výpočet objemu směsi lze pomocí objemu plynu při tlaku určit vztahem [7]:

$$\text{➤} \quad V = V_k + V_g = V_k \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} \right) = V_k \cdot (1 + \alpha_p) \quad (3.10)$$

Dosazením rovnice 3.10 do vzorce 3.4 získáme vztah [7]:

$$\text{➤} \quad K = -V \cdot \frac{dp}{dV} = -V_k \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \cdot \frac{dp}{dV} = -V_k \cdot (1 + \alpha_p) \frac{dp}{dV} \quad (3.11)$$

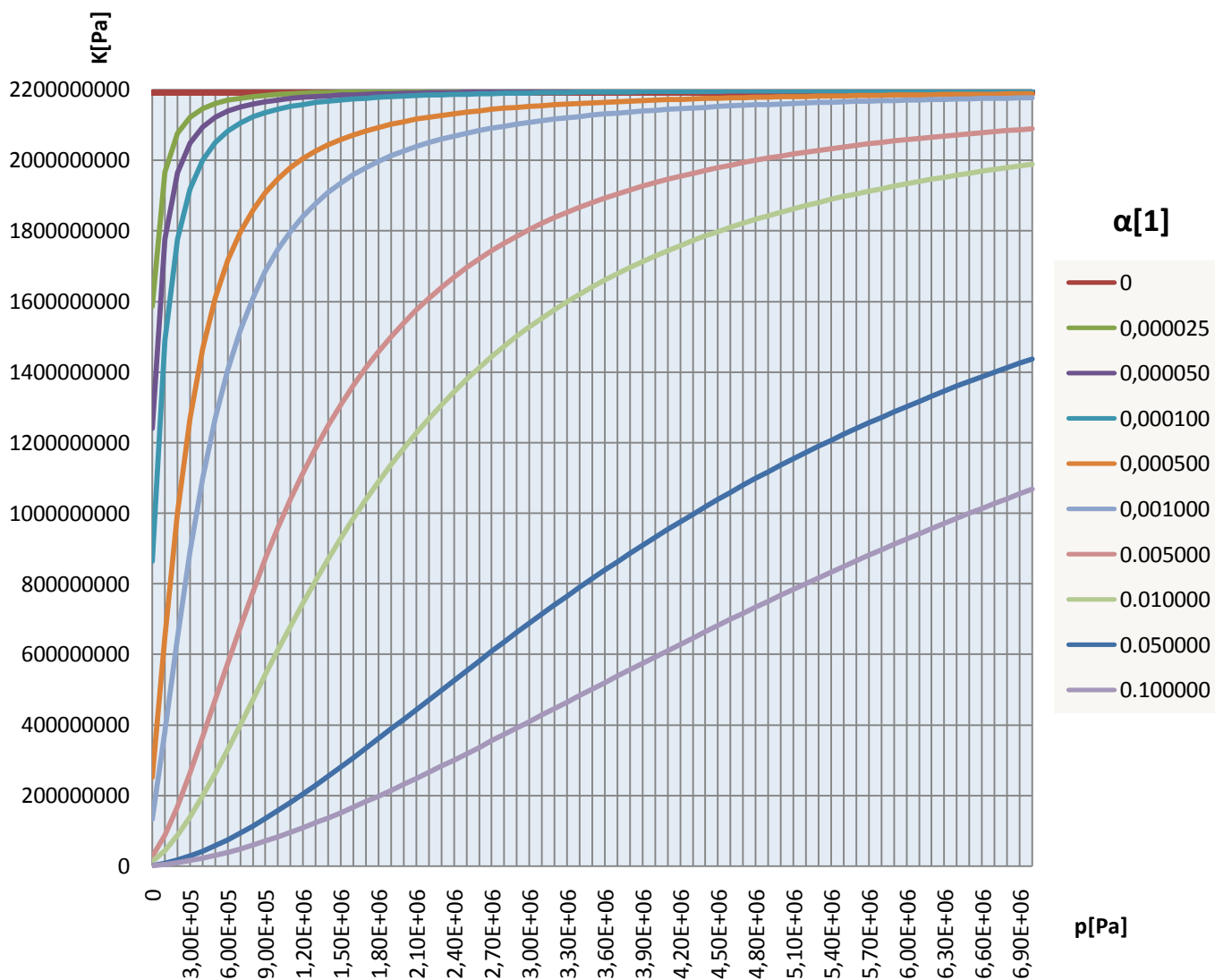
- po odvození dostaneme vztah:

$$\text{➤} \quad K = K_k \cdot \frac{1 + \alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} + \alpha \cdot K_k \cdot \frac{p_{ref}^{\frac{1}{n}}}{n \cdot (P_{ref}+p)^{\frac{n+1}{n}}}} \quad (3.12)$$

- za předpokladu že: $\alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} < 1$ dostaneme zjednodušený vztah:

$$\text{➤} \quad K = K_k \cdot \frac{1 + \alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}+p} \right)^{\frac{1}{n}} + \alpha \cdot K_k \cdot \frac{p_{ref}^{\frac{1}{n}}}{n \cdot (P_{ref}+p)^{\frac{n+1}{n}}}} \quad (3.13)$$

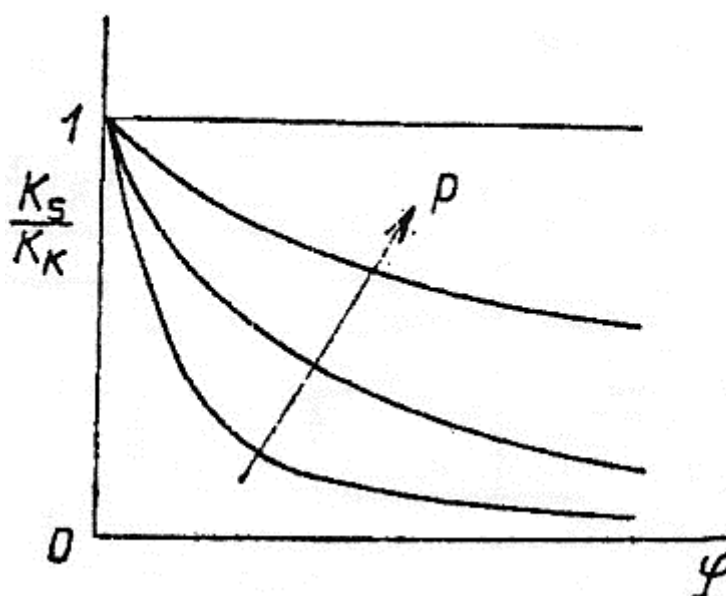
Pro výpočet modulu objemové pružnosti **pro vodu** a následné vykreslení byl použit upravený vztah 3.13. Výpočet byl proveden pro různé tlaky a objemový zlomek α při referenčním tlaku P_{ref} byl zakreslen do grafu v Microsoft Excel viz obr. 3.4.



Obr. 3.4 Modul objemové pružnosti v závislosti na tlaku a objemovém obsahu vzduchu

4 MĚŘENÍ OBSAHU VZDUCHU

Prostým rozdílem objemu směsi a oleje bez nerozpuštěného vzduchu a zvážením vzorků oleje z provozu hydraulických přístrojů byla zjištěna hodnota koncentrace rozpuštěného vzduchu do 30%. Na obr. 4.1 je vyjádřena závislost objemového modulu pružnosti oleje a jeho směsi se vzduchem na tlaku a objemovém obsahu vzduchu. Tyto hodnoty byly vypočteny dle teoretických vztahů, a proto je důležité znát hodnotu objemového množství vzduchu a oleje. Získání množství obsahu vzduchu vzorkováním je časově náročné a málo přesné [8].



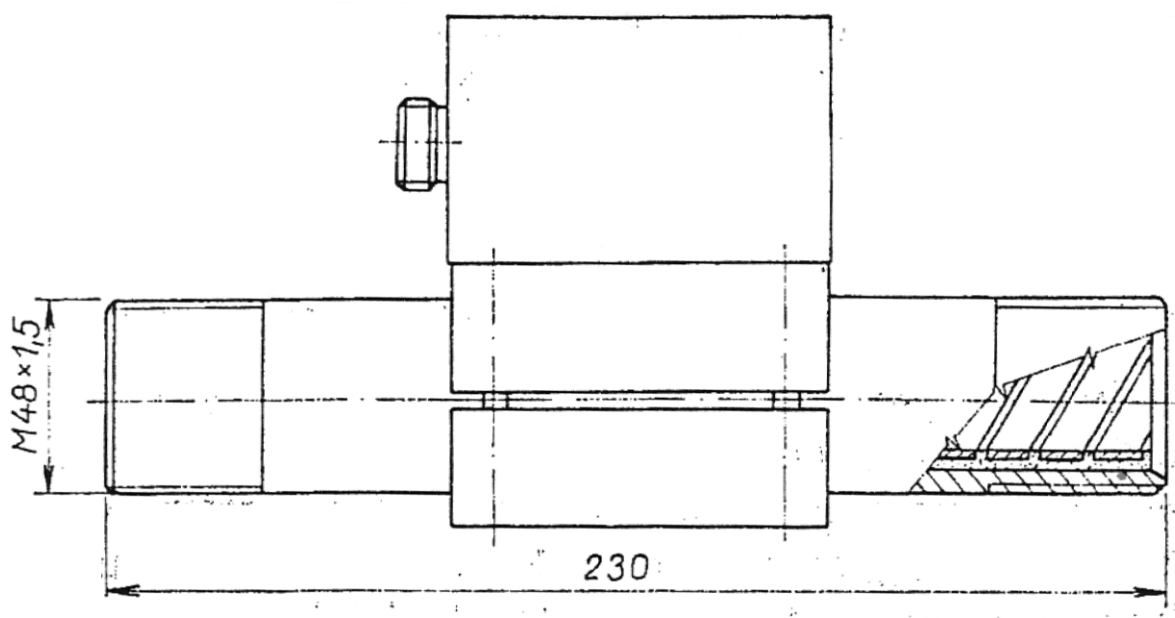
Obr. 4.1 Závislost poměru objemových modulů pružnosti směsi a oleje na tlaku a objemové koncentraci vzduchu [8]

Jelikož je tato metoda časově zdlouhavá a je založena jen na teoretických základech, byl proveden experiment, ve kterém bylo zapotřebí, aby byl měřič obsahu vzduchu v minerálním oleji vsazen přímo do tlakové větve hydraulického systému a jeho čidlo poskytovalo údaje o obsahu nerozpuštěného vzduchu kontinuálně v jednotlivých časech. Za těchto požadavků byl sestaven měřič obsahu vzduchu založený na kapacitní metodě. Princip funkce, parametry a výhody tohoto snímače jsou popsány v další podkapitole [8].

Vysoká škola báňská, inspirována poznatky uvedenými v časopise Měřicí Technika, vytvořila měřič obsahu vzduchu, který bude sloužit k následnému vyzkoušení a k porovnání výsledků se zakoupeným měřičem vzduchu. Měření obsahu vzduchu a jeho vliv na hydraulický ráz bude uveden v laboratorním měření v kapitole 5.

4.1 Měřič obsahu vzduchu

Snímač na obr. 4.2 byl zkonstruován pro vestavění do hydraulického systému a je založen na principu kapacitní metody. Její princip spočívá na změně dielektrické permitivity kapalinového kondenzátu, která se mění podle množství obsahu nerozpuštěného vzduchu v kapalině. Olej se vzduchem tvoří nevodivou směs, ale oba mají odlišnou dielektrickou permitivitu ε . Přičemž platí pro olej $\varepsilon = 2.3 - 2.4$ a naopak pro vzduch $\varepsilon = 1$. Tudíž platí lineární závislost změny permitivity mezi těmito uvedenými hodnotami, a to při snížení obsahu vzduchu. Vyrobený měřič bude zaznamenávat malé změny kapacity, které jsou dány změnou permitivity kapalinového kondenzátoru, přičemž dielektrikum tvoří směs vzduch a oleje [8].



Obr. 4.2 Snímač obsahu vzduchu v oleji [8]

➤ Výhody kapacitní metody:

- jednoznačnost údajů
- možnost práce v dynamickém režimu vlivem nepatrné časové konstanty
- zanedbatelné zpětné působení snímače
- možnost řešení snímače jako průtokového
- mechanická odolnost
- jednoduchá výroba a nízká výrobní cena

Na snímači mající tvar trubky jsou umístěny měděné elektrody ve tvaru dvojchodého závitů, které lze vidět v řezu na obr. 4.2. Systém elektrod je v trubce zalit směsí epoxidové pryskyřice s křemičitým pískem. K odstranění případných bublin v izolační hmotě se zalití uskuteční ve vakuu, čímž zaručíme i potřebné mechanické vlastnosti. Na objímce, která je přidělena k trubce, je připevněna část můstku, předzesilovač a deska konektoru. Kompenzační kondenzátory jsou zabudovány v objímce a kabelem s konektory je snímač připojen k elektronické části měřiče [8].

4.1.1 Cejchování měřiče obsahu vzduchu

Cejchování lze provést třemi způsoby, které jsou podrobně popsány v časopise Měřicí Technika [8]. Všechny jsou založeny na teoretickém předpokladu, že závislost výstupního signálu ze snímače na obsahu vzduchu v kapalině bude mít lineární výsledný charakter, což se ve všech případech i prakticky potvrdilo.

➤ Možné způsoby cejchování:

- 1) Osově symetrický elektrodový systém
- 2) Plnění snímače různě provzdušněným olejem
- 3) Měření změny oleje ve snímači

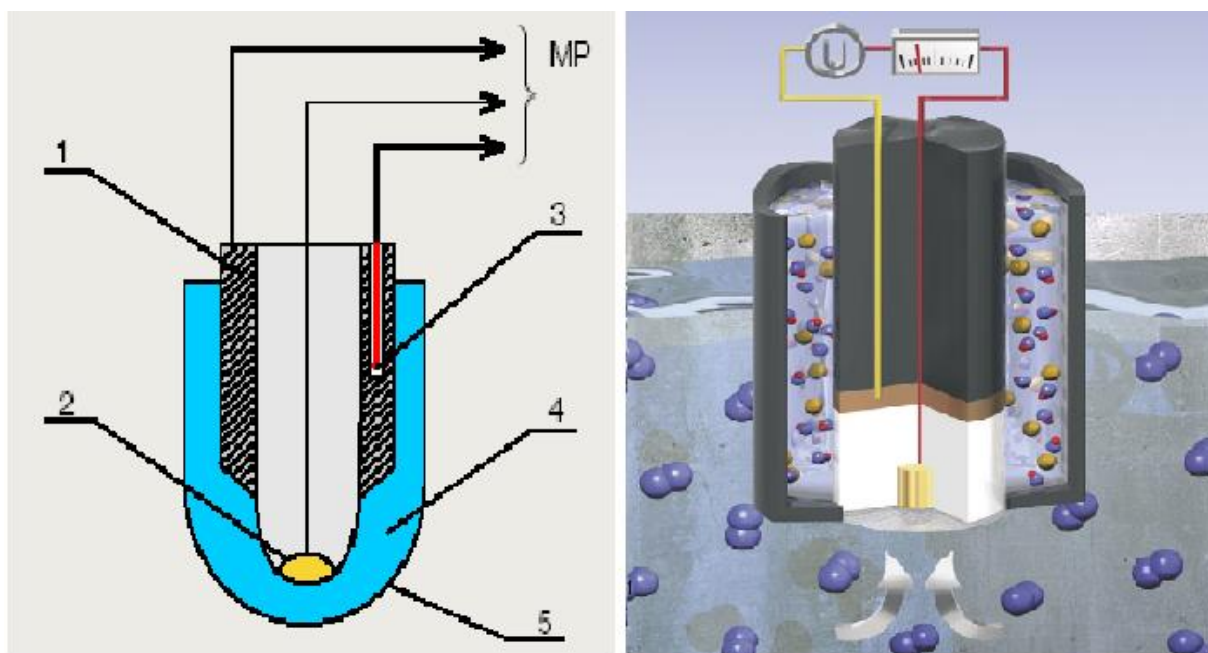
4.2 Moderní měřiče obsahu vzduchu

V dnešní době je na trhu velké množství měřících přístrojů, kterými lze měřit množství vzduchu v kapalinách, ale také například hodnotu pH (kyselosti/zásaditosti) a oxidačně redukčního potenciálu (ORP) [11].

Přístroje pro určení obsahu kyslíku můžeme rozdělit do dvou základních skupin podle způsobu měření O_2 v kapalinách. Metoda elektrochemického stanovení obsahu O_2 , kterou lze také definovat jako metodu ampérometrickou. Druhá metoda je založena na optickém měření kyslíku obsaženém ve vodě. Oba způsoby mají své plusy a mínusy, a proto budou jejich vlastnosti, výhody a rozsahy měření porovnány v následujících podkapitolách.

4.2.1 Elektrochemické měření vzduchu v kapalině

Pro měření obsahu vzduchu v kapalině se zde používají ampérometrické snímací sondy, které jsou založeny na měření proudu mezi dvěma elektrodami potopenými v roztoku elektrolytu. Hodně rozšířenou je Clarkova sonda pro měření obsahu kyslíku, která je sestavena z pracovní (katoda) a srovnávací (anoda) elektrody. Měřicí převodník nám přivádí na elektrody polarizační napětí asi 0,8 V. Elektrolyt je tvořen vodným roztokem KCl nebo KBR. Polopropustná membrána uzavírá měřicí sondu a izoluje gelový elektrolyt od měřeného roztoku, ale pro kyslík je propustná viz obr. 4.4.



Obr. 4.4 Princip měření obsahu rozpuštěného vzduchu v kapalině [11] [12]

- 1) anoda (Ag) MP– měřicí převodník z vyhodnocovací jednotkou
- 2) katoda (Au)
- 3) termistor
- 4) gelový elektrolyt
- 5) membrána

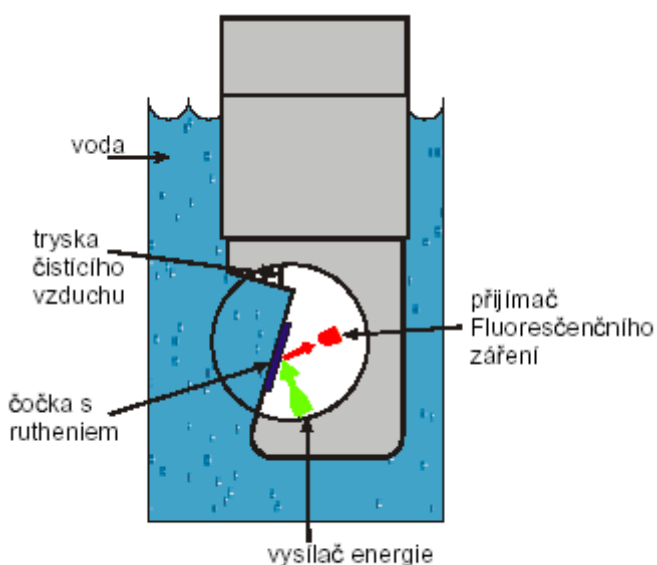
Jestliže vložíme sondu do měřeného roztoku, molekuly kyslíku obsažené v kapalině difundují membránou, vznikají oxidačně redukční reakce na elektrodách a mezi elektrodami protéká proud, jehož velikost závisí přímo úměrně na obsahu kyslíku v kapalině. Množství obsaženého vzduchu v kapalině je značně závislé na teplotě, kterou měří sonda termistorem a výsledný signál se využije pro automatickou kompenzaci působení teploty v převodníku [11].

Měření touto metodou je časově náročné, jelikož dochází k pomalému ustálení měřené hodnoty, a to za dodržení stanovených podmínek. Dále je nutná častá údržba a kalibrace přístrojů. Dalším nežádoucím prvkem je částečné spotřebování kyslíku vlivem reakcí v elektrodách a tím i skreslení výsledných hodnot. Kapalina tudíž musí při měření obsahu kyslíku proudit, v opačném případě by se kyslík v oblasti sondy zcela spotřeboval a měření by nemělo smysl [13].

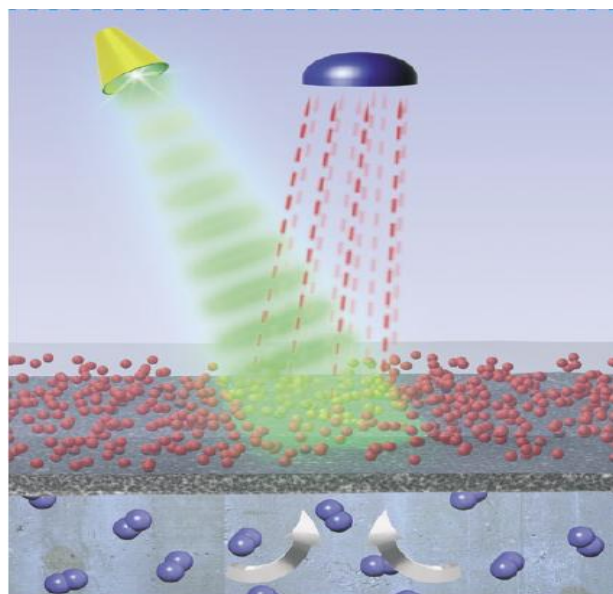
4.2.2 Optické měření kyslíku fluorescenční metodou

Optická sonda je vytvořena pro měření fyzikálního jevu luminiscence. Jestliže dráždíme luminiscenční materiál jiným simulantem, než teplem, vyzařuje světlo.

Používaným luminiscenčním materiálem je poměrně vzácný kov ruthenium, který je zalit do polymerové čočky. Na tu působí z jedné strany kapalina s obsahem kyslíku a na opačné straně je ozařována zeleným světlem viz obr. 4.5. Světelný impulz prochází čočkou na luminofor, kterému předá část své zářivé energie, jejímž následkem některé elektrony v luminoforu přeskočí ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu. Z této hladiny se během několika mikrosekund dostanou zpět na základní energetickou hladinu za vzniku fluorescenčního záření, neboli červeného světla viz obr. 4.6. Fotodioda snímá velikost tohoto fluorescenčního záření a následná koncentrace kyslíku se stanoví na základě doby vyzařování červeného světla [14] [15].

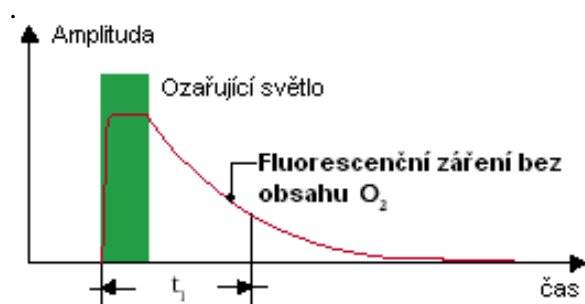


obr. 4.5 Princip měření optickou metodou [14]



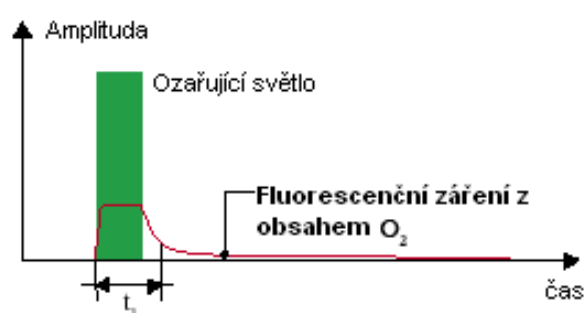
obr. 4.6 Vznik fluorescenčního záření [17]

Molekuly kyslíku dokáží absorbovat energii elektronů o vyšší energetické hladině vznikající v luminoforu vlivem ozáření a umožní jim, aby se vrátily na původní energetickou hladinu bez vyzáření světla. Proto čím výraznější bude úbytek obsahu vzduchu v kapalině, o to se zvýší intenzita fluorescenčního záření. Tato závislost je znázorněna na obrázku 4.7, kde zelená plocha určuje dodávané záření na luminofor a velikost fluorescenčního záření udává červená křivka. Z obrázku 4.7.1 je patrné, že při malém množství kyslíku je velikost fluorescenčního záření velká, naopak při velkém obsahu kyslíku viz obr. 4.7.2 je hodnota fluorescenčního záření malá [15].



obr. 4.7.1

Fluorescenční záření bez obsahu O_2



obr. 4.7.2

Fluorescenční záření s obsahem O_2

Obr. 4.7 Závislost fluorescenčního záření na obsahu kyslíku [18]

4.2.3 Porovnání obou způsobů měření rozpuštěného kyslíku

Optické metody měření koncentrace kyslíku nabízejí oproti klasickým elektrochemickým metodám mnoho výhod, a to jak z hlediska naměřených hodnot, tak i nutnosti údržby. Nejčastějším problémem u Clarkovy sondy je mechanicky namáhaná membrána, u které často dojde k poškození, jež má za následek špatně naměřené hodnoty a její výměna je naprosto nezbytná. Tato vada je u měření optickou metodou vyloučena, jelikož jsou elektrody a membrána nahrazeny vrstvou citlivou na kyslík, která se nachází na víčku sondy. Údržba tohoto modelu spočívá pouze ve výměně víčka sondy jednou za dva roky. Víčko je konstruováno tak, aby bylo zejména odolné mechanickému zatížení. Další výhodou této metody je fakt, že nespotřebovává žádný kyslík, tudíž nedochází ke zkreslení naměřených hodnot. Měření nízkých koncentrací kyslíku s vysokou přesností patří k dalším přednostem této techniky. U klasických elektrochemických postupů trvá nejméně 3 minuty, než získáme stabilní měřenou hodnotu, zato optická metoda je v průměru 3 krát rychlejší. Měření optickou technologií není navíc závislé na tlaku, barvě, průtoku kapaliny a kalibrace se provádí jen jednou za rok [13] [15].

Kdybych měl porovnat obě metody, jednoznačně by vyhrála optická metoda měření kyslíku. Tento fakt chápou jak výrobci sond, tak kupující, a veškerá snaha je určena do inovací a nahrazení ampérometrických sond za optické. Jelikož jsou přesné výsledky měření koncentrace kyslíku v kapalinách velmi důležité a jejich využití je uplatněno například ve zdravotnictví (měření okysličení krve), potravinářství (měření množství rozpuštěného kyslíku v pivovarech), čištění odpadních vod a mnoha dalších, tak v dnešní době většina zákazníků přechází na prakticky bezúdržbovou a snad všemi směry výhodnou optickou metodu. V tabulce č. 1 jsou porovnány vlastnosti ampérometrického a optického senzoru, kde lze najít další výhody optické metody.

Princip měření	<i>Ampérometrický</i>	<i>Optický</i>
Typ senzoru	Oxyferm FDA	optický Visiform DO
Mechanicky choulostivá membrána	ano	ne
Agresivní elektrolyt	ano, s možností úniku při poškození membrány	ne
Maximální provozní tlak/teplota	0,6MPa/130°C	1,2MPa/130°C
Citlivost na změny průtoku média	odchylka až 3% mezi měřeními v proudícím a stojícím médiu	měření nezávislé na rychlosti průtoku média
Doba přípravy k provozu	doba polarizace (stabilizace): typicky 15 minut, max. 120 minut	do 1 minuty
Možné působení měřeného média	přítomnost kyselých plynů jako CO ₂ a H ₂ S může změnit zásaditý elektrolyt a způsobit chyby při měření	přítomnost kyselých plynů jako CO ₂ a H ₂ S nemá žádný vliv na přesnost měření
výstupní rozhraní senzoru	typický analogový signál 60 nA	unifikovaný proudový signál 4 až 20 mA
Maximální délka kabelu	do 10 m	do 1000 m
Diagnostika a údržba	nutná vizuální kontrola, obtížně se rozezná porucha od nulové koncentrace O ₂ ; membránu a elektrolyt je třeba pravidelně vyměňovat	trvale je sledována správná funkce senzoru, občas se mění jen měřicí hlavice jako celek
Montáž senzoru	jen svisle	v libovolné pozici
Měřicí zesilovač	samostatný (vnější)	vestavěný senzor
Orientační cena v provedení s výstupem 4-20 mA	senzor, kabel a měřicí zesilovač: asi 2000 eur	senzor a kabel: asi 1 200 eur

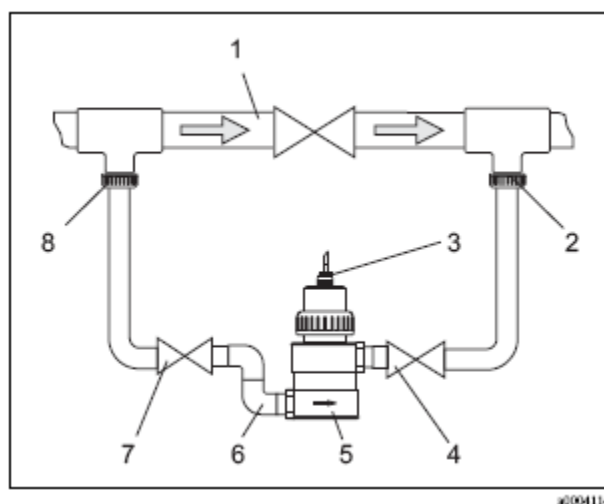
Tab. 1. Vlastnosti ampérometrické a optické sondy pro měření rozpuštěného kyslíku [16]

4.2.4 Možné způsoby montáže

Měřicí sondy pro měření rozpuštěného vzduchu musí být vloženy do obvodu ve speciálních armaturách, které jsou konstruovány buď jako ponorné, nebo jako průtokné.

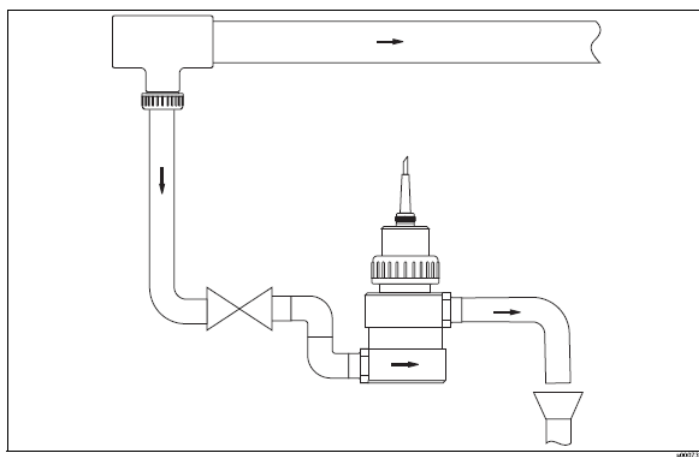
- **ponorný provoz** - univerzální držák a řetězová armatura
 - univerzální držák a pevně přimontovaná armatura
 - ponorná trubka upevněná na okraj nádrže
 - plovák
- **průtokový provoz** - průtoková armatura

Průtoková armatura je vhodná pro použití v potrubí. Přívod pro kapalinu se nachází na dně armatury a vývod ve vrchní části. Armaturu je možno spojit s potrubím přes závit G3/4. Lze zakoupit i armatury s automatickým větráním, které zabrání usazování nečistot na měřící sondě. Možné způsoby montáže průtokových armatur viz obrázky 4.8 a 4.9.



- 1) Hlavní vedení
- 2) Návrat média
- 3) Kyslíkový senzor
- 4) Ruční nebo magnetický ventil
- 5) Průtoková armatura
- 6) 90° trubkové kolena
- 7) Ruční nebo magnetický ventil
- 8) přívod média

Obr. 4.8 Obtoková instalace s ručními nebo magnetickými ventily [12]



Obr. 4.9 Instalace se svobodným výtokem [12]

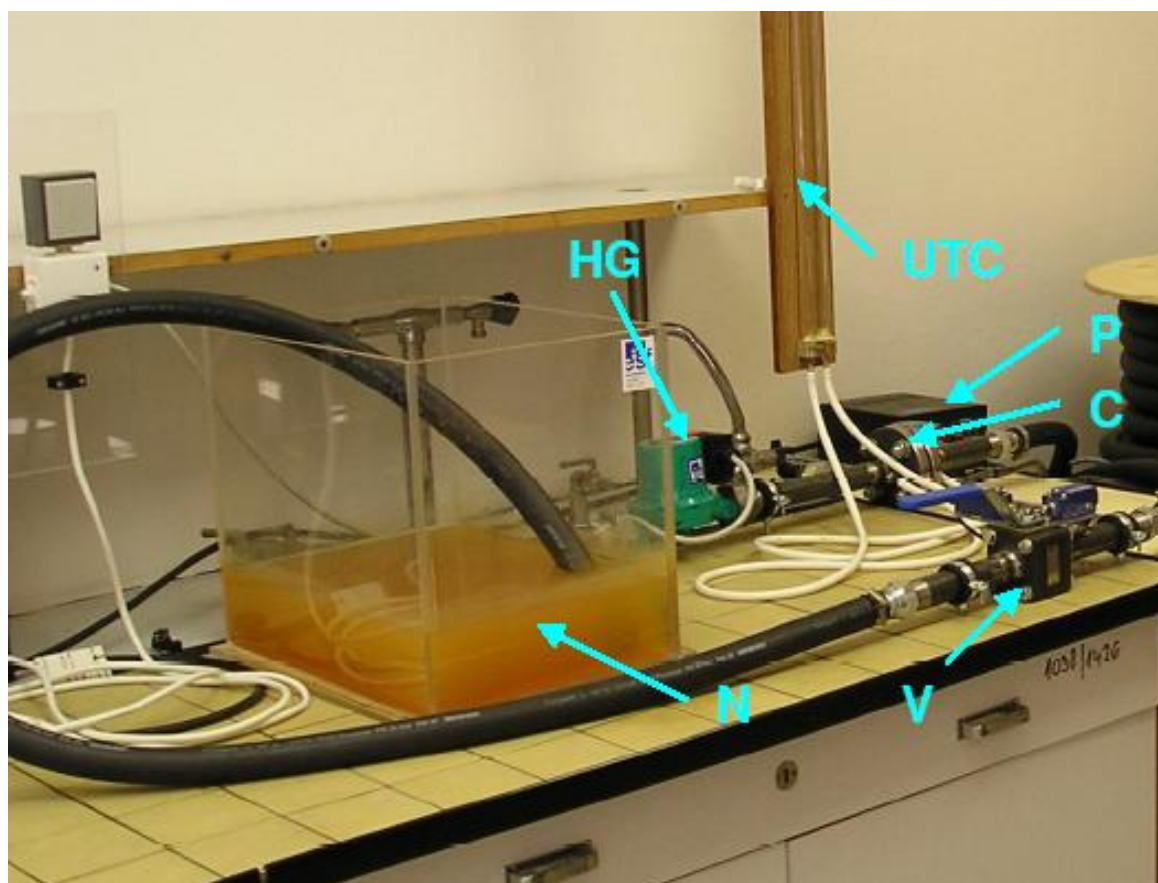
5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Měřicí trať pro měření hydraulického rázu [20] byla upravena tak, aby dokázala zachytit změnu hydraulického rázu, při různém obsahu vzduchu. Poněvadž doba pro výrobu měřicí sondy k určení množství vzduchu byla výrazně prodloužena, bylo měření hydraulického rázu provedeno těmito způsoby:

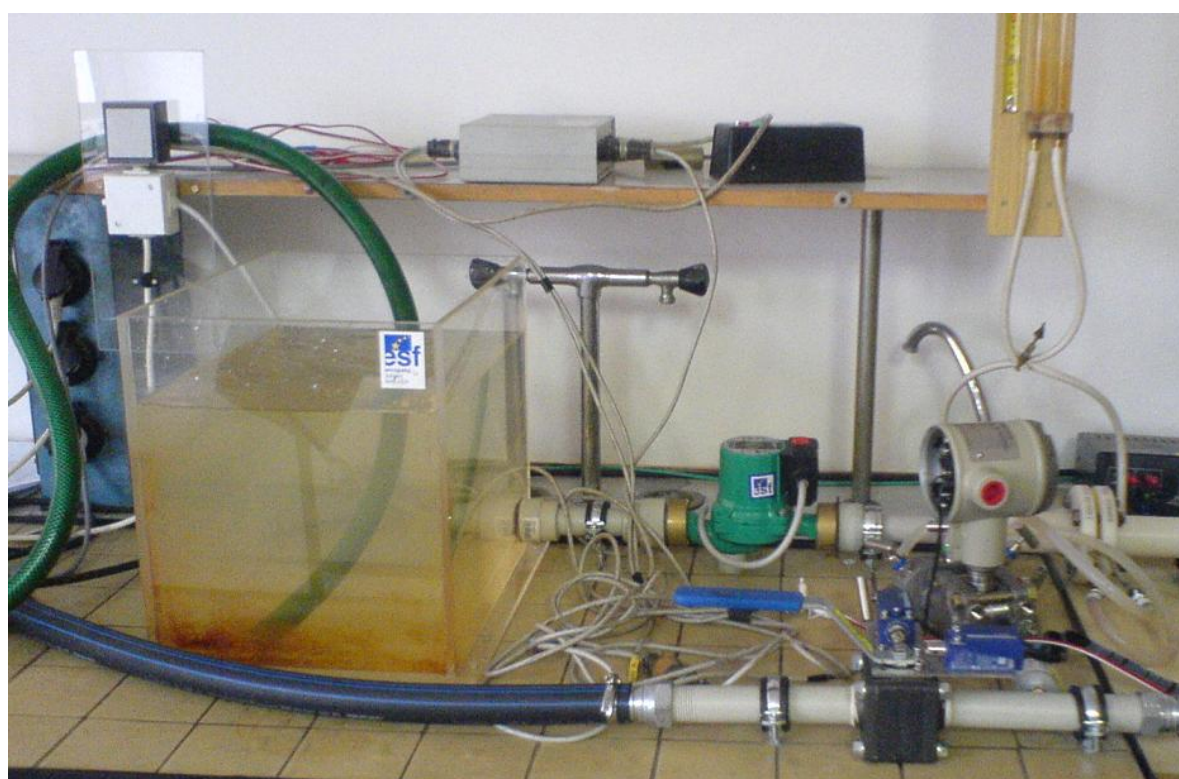
- 1) Pro odstátou nádrž s vodou, kde je obsah vzduchu v kapalině o malé koncentraci \Rightarrow malý obsah vzduchu
 - 2) Pro provzdušněnou nádrž s vodou, kde je obsah vzduchu v kapalině o vysoké koncentraci \Rightarrow velký obsah vzduchu
- Změnu hydraulického rázu zachycujeme tlakovými snímači, které nám zaznamenají změnu tlaku v čase, při náhlém uzavření uzavíracího ventilu.
 - Z naměřených hodnot vykreslím průběhy tlaků a následně porovnáím vliv obsahu vzduchu na měřený hydraulický ráz pro oba způsoby měření.

5.1 Renovace obvodu k měření hydraulického rázu

K určení hydraulického rázu nám slouží mnoho prvků a snímačů. Aby tyto přístroje měřily s největší přesností, je nutno dodržet několik podmínek. Homogenní kapalina při stálé teplotě nesmí obsahovat tuhé částice a musí být tvořena jednou fází. Bývalá měřicí trať (viz obr. 5.1) byla zastaralá a opatřená kovovým potrubím a dalšími kovovými prvky, které již silně korodovaly a zanášely nádrž rzi a různými nečistotami. Při měření na této trati nelze zamezit chybám měřících přístrojů, kde nečistoty mohou zanést snímače, které se musí vyčistit a může dojít až k jejich zničení. Proto byla sestavena nová měřicí trať, kde byla vyměněna clona, potrubí a kovové spojovací prvky za plastové materiály. Nový obvod (viz obr. 5.2) splňuje nutné podmínky, což zajišťuje maximální přesnost při měření.

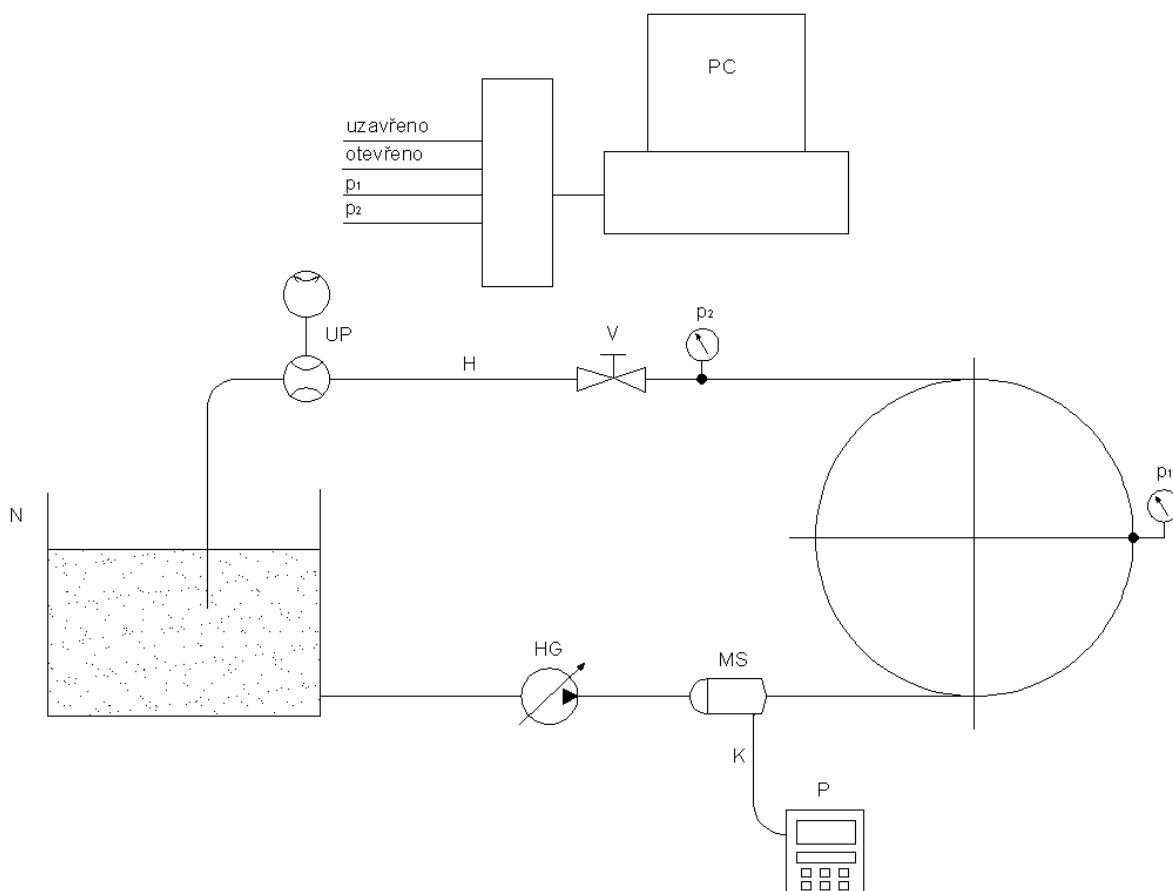


Obr. 5.1 Původní měřící trať [20]



Obr 5.2 Renovovaná měřící trať

5.2 Návrh schématu a popis měřícího zařízení



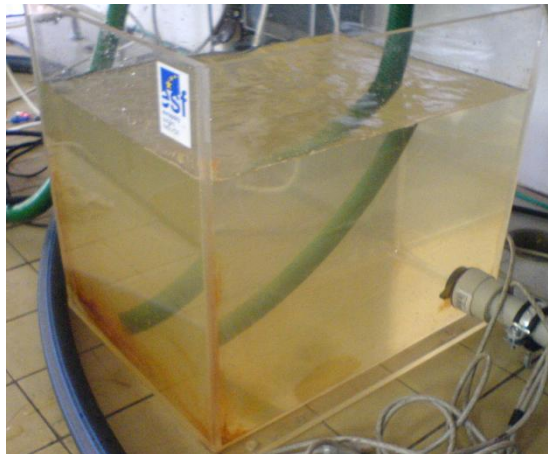
Obr. 5.3 Návrh hydraulického schématu trati pro měření obsahu rozpuštěného vzduchu a hydraulického rázu

Měřicí trať (viz obr. 5.3) je určena pro měření hydraulického rázu při určení množství rozpuštěného vzduchu v kapalině a následném posouzení jeho působení na hydraulický ráz. Z nádrže **N** je čerpána voda čerpadlem **HG**, které nasává vodu za pomoci hadic **H** do obvodu. Za čerpadlem je umístěna měřící sonda **MS**, která vyhodnocuje množství kyslíku a za pomoci kabelu **K** předává proudový signál (mA) do vyhodnocovacího převodníku **P**, který na displeji ukáže hodnotu obsahu rozpuštěného kyslíku (% anebo mg/l) a aktuální teplotu měřeného média ve °C. Na hadici o celkové délce $l = 48,4\text{m}$ jsou umístěny dva snímače tlaku (p_1 , p_2). Uprostřed obvodu je vsazen snímač p_1 a před ventilem **V** vyhodnocuje tlak snímač p_2 . Výstupní analogové signály snímačů tlaků jsou převáděny přes analogově digitální převodník (karta AD 612 firmy Humusoft) do počítače **PC**, kde za pomoci programu vytvořeném v Matlabu – Simulink lze vyčíst hodnoty požadovaných tlaků jak v číselné, tak v grafické podobě. Jednotlivé průtoky lze sledovat na displeji ultrazvukového průtokoměru **UP**.

5.3 Specifikace a popis měřících prvků

➤ NÁDRŽ (N):

- Objem nádrže: 42 dm³
- Výrobce: Valter Špalek – Plexi



Obr. 5.4 Nádrž

➤ ČERPADLO (HG):

- Typ: cirkulační čerpadlo
WILO RS 25/4 230 V PN 10
- Maximální tlakový spád: 10 kPa
- Maximální výtlak: 4-2 m
- Maximální průtok: 3,1 m³/hod
- Jmenovité otáčky: 1200/1650/2000 min⁻¹
- Výrobce: WILO Praha s.r.o



Obr. 5.5 Cirkulační čerpadlo [19]

➤ SNÍMAČE (p_1 , p_2):

- Typ pro (p_1): TMG 518 Z3G
- Rozsah: (0 až $1 \cdot 10^5$) Pa
- Typ pro (p_2): TMG 567 Z3G
- Rozsah: ($-1 \cdot 10^5$ až $5 \cdot 10^5$) Pa
- Výrobce: CREESTO Rožnov pod
Radhoštěm
- Napájení: (12 až 36) V
- Výstup: (0 až 20) mA
- Závit: M12x1,5



Obr. 5.6 Snímač tlaku [20]

➤ UZAVÍRACÍ VENTIL (V):

- Typ: kulový kohout DN25
- Tlaková třída: ANSI 200
- Výrobce: MARTECH Hradec Králové



Obr. 5.7 Uzavírací ventil se dvěma snímači polohy [20]

➤ ZDROJ NAPĚTÍ (Z):

- určen pro napájení snímačů tlaku
- Typ: BK125 (školní stabilizovaný)
- Napájení: 220V/50 Hz



Obr. 5.8 Zdroj napětí [20]

➤ HADICE (H):

- Typ: MP 20EPDM
- Výrobce: KONEKT Hradec Králové
- Pracovní tlak: 2 MPa
- Průměr: 25/35 mm
- Hmotnost: 0,6 kg·m⁻¹
- Odolnost teplotám: -40°C ÷ +95°C
- Bezpečnostní faktor: 4:1



Obr. 5.9 Hadice

➤ SNÍMAČ OBSAHU KYSLÍKU (MS):

- Typ: COS61 – A1F0
 - A protokol BNV
 - 1 délka kabelu 7m
 - F závit G1
 - 0 bez příslušenství
- Výrobce: Endress + Hauser
- Měřicí rozsah: 0,01 - 20 mg /l
- Rozsah tlaku: 0 - 400 hPa
- Pracovní teplota: -5°C ÷ 55°C (23 ÷ 131°F)
- Maximální tlak: 10 bar
- Hmotnost: 0,7 kg
- Maximální odchylka měření: ±2%
- Připojení: závit G1
- Životnost snímače čepice: > 2 roky
- Kompatibilní s převodníky: COM2x3W
- Prakticky bezúdržbový



Obr. 5.10 Snímací sonda COS61 pro měření kyslíku [12]

➤ PRŮTOČNÁ ARMATURA PRO OPTICKOU SONDU COS61:

- Typ: COA250-B
B ... Aplikace: COS61
- Výrobce: Endress + Hauser
- Materiál: PVC
- Maximální pracovní teplota: 50 °C (122° F)
- Maximální pracovní tlak: 6 bar ÷ 20°C, 4 bar ÷ 50°C
- Hmotnost: 0,5 kg
- Procesní připojení: G3/4



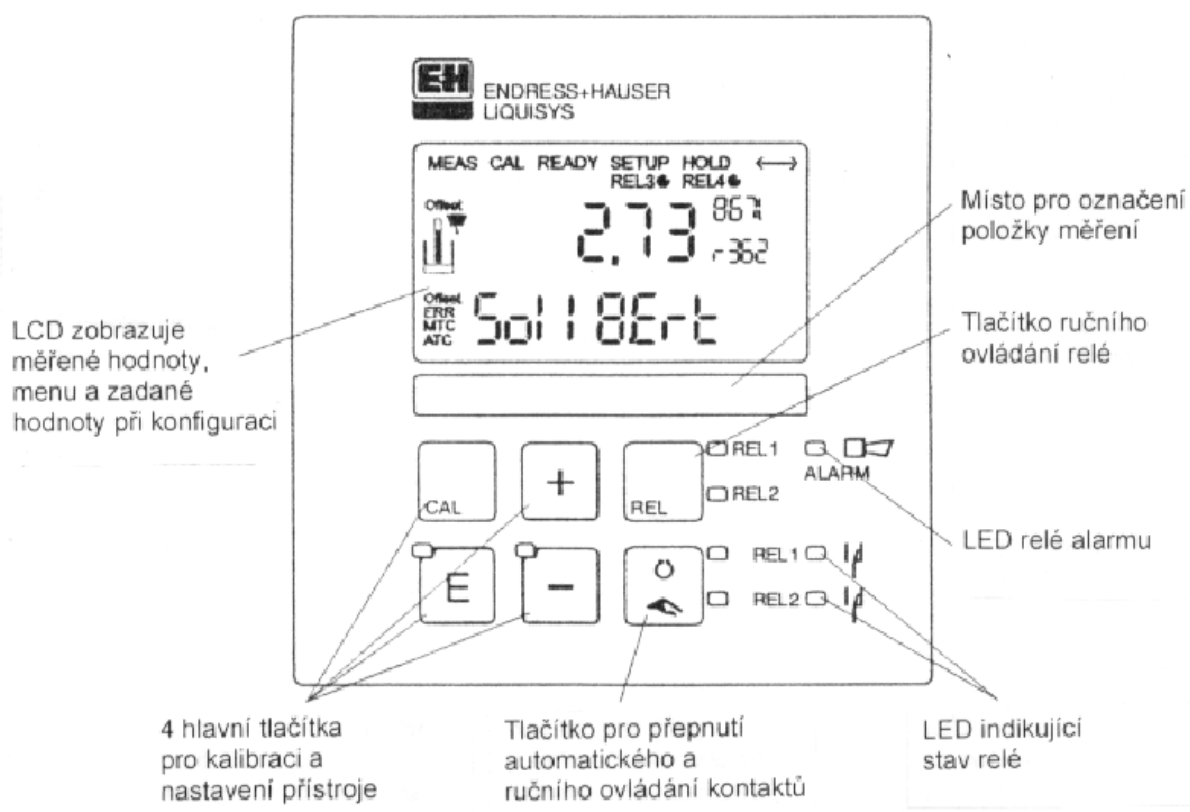
Obr. 5.11 Průtočná armatura COA250-B [12]

➤ PŘEVODNÍK PRO MĚŘENÍ KYSLÍKU (P):

- Typ: COM 253
- Výrobce: Endress + Hauser
- Rozměry (v x š x h): 247 x 170 x 145 mm
- Hmotnost: 2,3 kg
- Napájení: 230 V



Obr. 5.12 Převodník pro měření obsahu kyslíku COM 253 [12]



Obr. 5.13 Popis displeje a ovládacích tlačítek převodníku COM 253 [12]

➤ ULTRAZVUKOVÝ PRŮTOKOMĚR (UP):

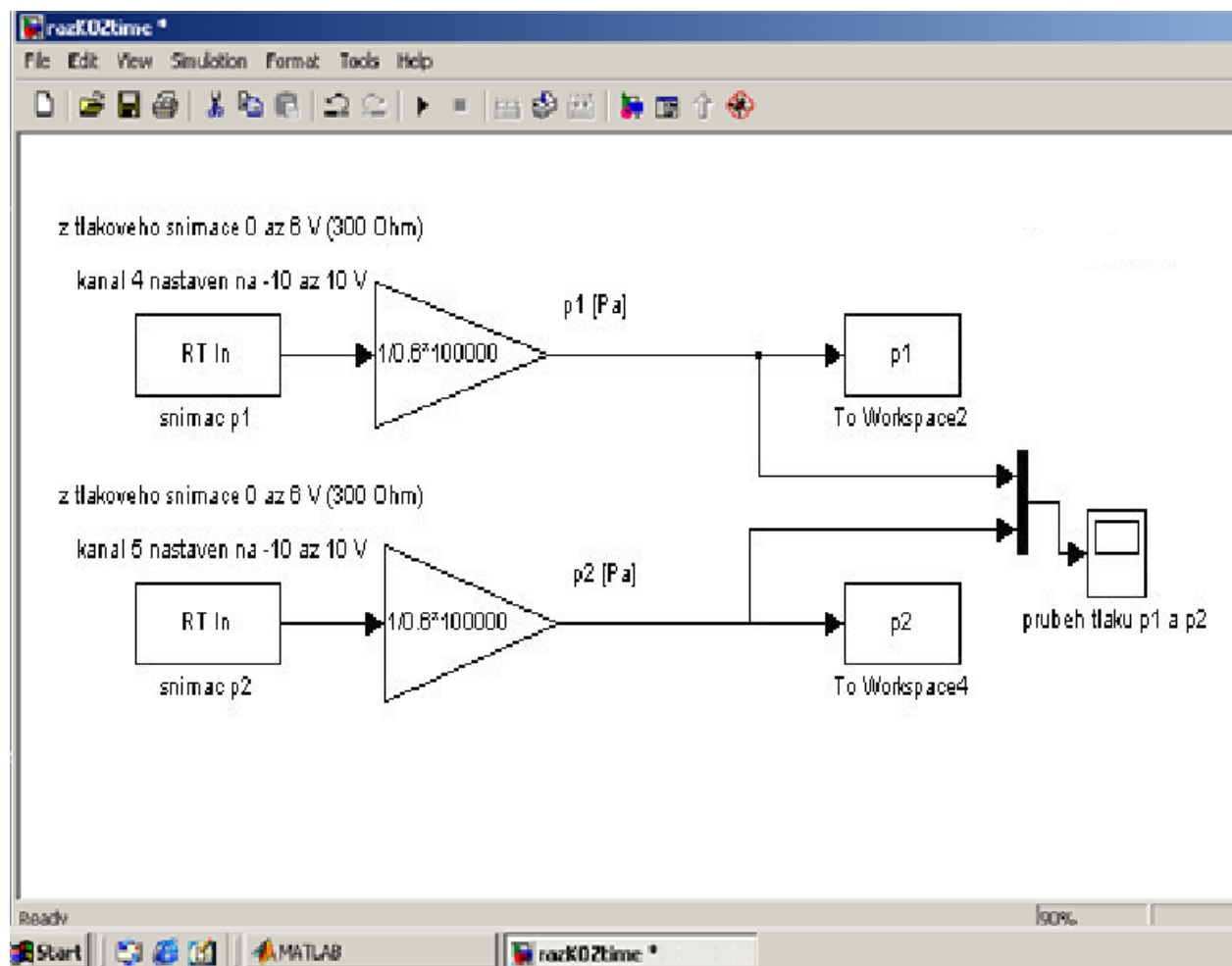
- Typ: FLOMIC FL 1014
- Výrobce: ELIS Plzeň Honeywell
- Tlak: 1,6 MPa
- Proudový výstup: (4÷20) mA
- Impulzní výstup: 10dm³/imp
- Napájení: 3,6V DC



Obr. 5.14 Ultrazvukový průtokoměr

5.4 Postup měření

- Ujistíme se, že je voda v nádrži odstátá \Rightarrow malý obsah vzduchu.
- Spustíme program Matlab 6.5.1, kde nastavíme příslušný adresář.
- Pro spouštění měření a záznam naměřených hodnot nám slouží prostředí Matlab-Simulink viz obr. 5.15.
- Zapneme čerpadlo a nastavíme jej na největší otáčky.
- Otevřeme uzavírací ventil a spustíme měření, které bylo nastaveno na 10 sekund.
- Přibližně po čtyřech sekundách prudce uzavřeme ventil a vyčkáme zbylou dobu do konce měření.
- Hodnoty průběhů tlaků p_1 a p_2 v čase zkopírujeme do programu Microsoft Excel, kde vytvoříme příslušné grafy průběhu tlaků při hydraulickém rázu pro odstátou nádrž.
- Čerpadlo nastavíme na střední a nejmenší otáčky a postup opakujeme.
- Vypustíme vodu z nádrže a napustíme ji po okraj sacího otvoru, nad který povytáhneme hadici, z které po zapnutí čerpadla bude vytékat voda, která vytvoří potřebné vzduchové bublinky v nádrži \Rightarrow velký obsah vzduchu
- Otevřeme uzavírací ventil a spustíme měření, které je opět přednastaveno na 10 sekund.
- Další postup je totožný, jako v odstáté nádrži.

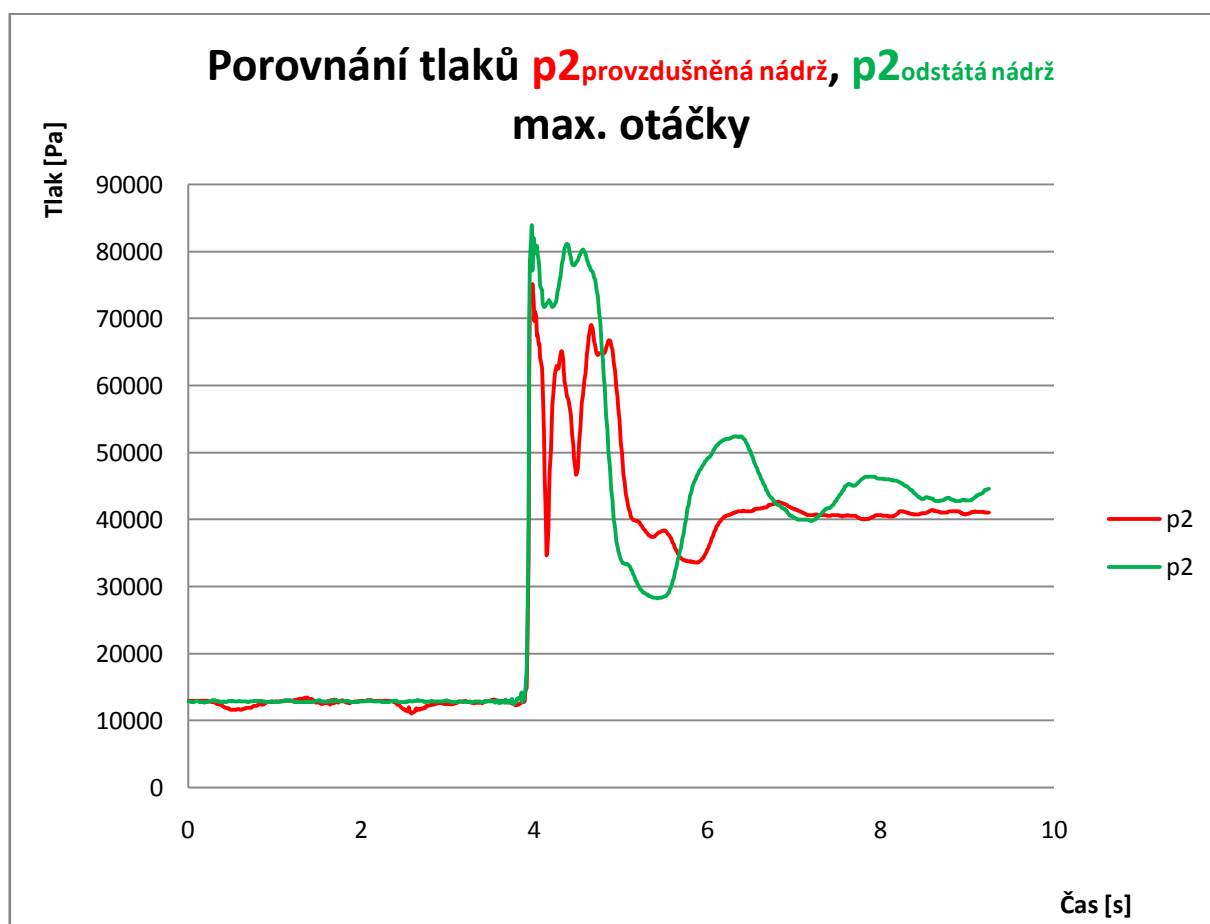


Obr. 5.15 Program razKoztime – vytvořený v programu Matlab – Simulink

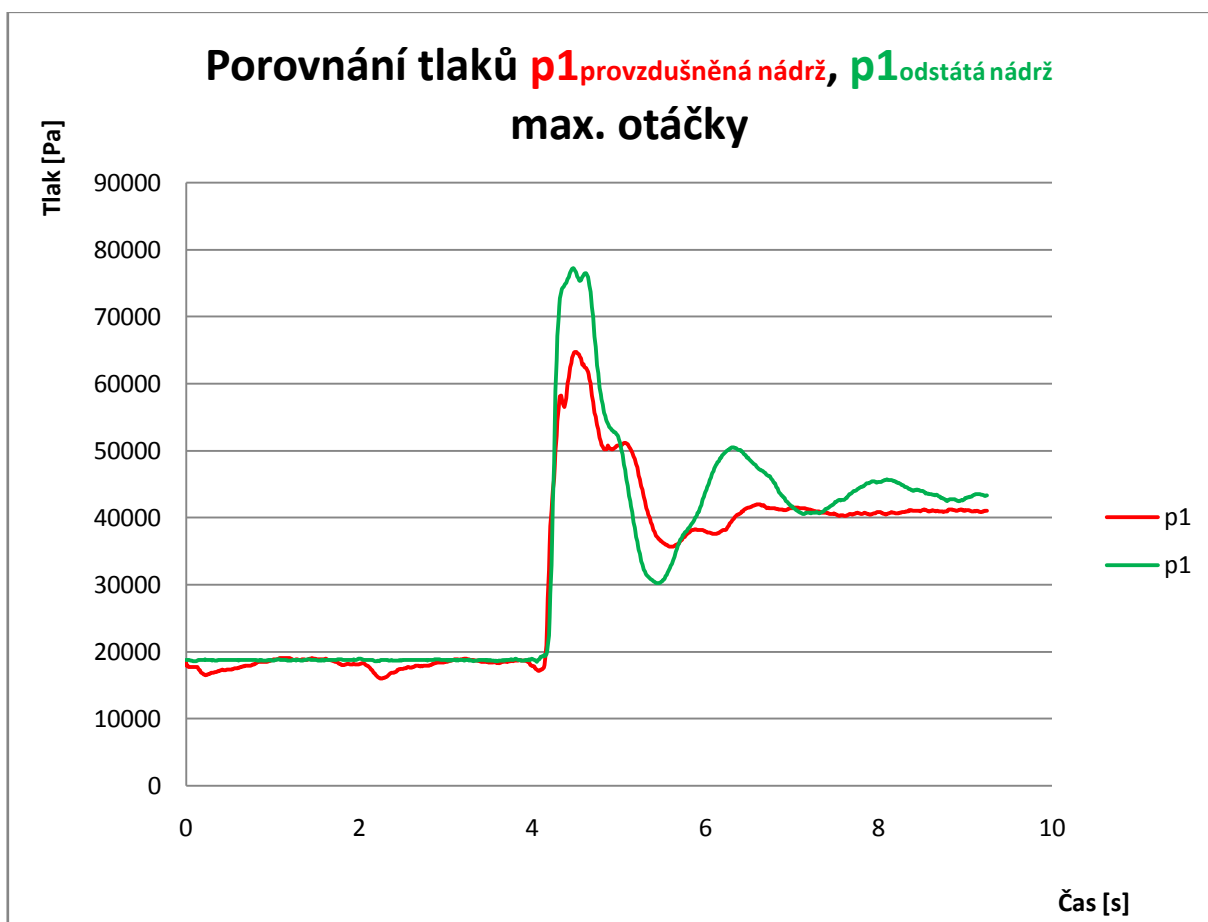
5.5 Grafy průběhu tlaků

Grafy průběhu tlaků při hydraulickém rázu pro oba způsoby měření byly vykresleny pro maximální otáčky čerpadla. Porovnání průběhu tlaků pro střední a nízké otáčky čerpadla jsou uvedeny v příloze P₁-P₆.

- na obrázku 5.16 jsou vykresleny průběhy tlaků p_2 (snímání tlaku před uzavíracím ventilem) pro odstátou a provzdušněnou nádrž, při maximálních otáčkách čerpadla
- na obrázku 5.17 jsou vykresleny průběhy tlaků p_1 (snímání tlaku uprostřed měřicího obvodu) pro odstátou a provzdušněnou nádrž, při maximálních otáčkách čerpadla



Obr. 5.16 porovnání tlaků p_2 - tlak před uzavíracím ventilem



Obr. 5.17 porovnání tlaků p_1 - uprostřed měřicího obvodu

5.6 Určení periody a výpočet rychlosti tlakové vlny

- přesnou hodnotu periody t_p získáme odečtením časů t_1 a t_2 z grafických průběhů tlaku
- čas t_1 přiřadíme pro nejnižší tlak v první vlně
- čas t_2 přiřadíme pro nejnižší tlak v druhé vlně
- pak hodnota periody t_p se bude rovnat: $t_p = t_2 - t_1$ (5.1)

➤ výpočet pro odstátou nádrž a maximální otáčky čerpadla:

- přesná hodnota periody pro tlaky p_1 a p_2 :

$$t_{p1} = t_2 - t_1$$

$$t_{p2} = t_2 - t_1$$

$$t_{p1} = 7,13 - 5,43$$

$$t_{p2} = 7,19 - 5,43$$

$$t_{p1} = 1,68 \text{ s}$$

$$t_{p2} = 1,76 \text{ s}$$

- rychlost tlakové vlny a_s :

- délka potrubí $l = 48,4\text{m}$

$$a_{s1} = \frac{2 \cdot l}{t_p/2} \qquad a_{s2} = \frac{2 \cdot l}{t_p/2} \qquad (5.2)$$

$$a_{s1} = \frac{2 \cdot 48,4}{1,68/2} \qquad a_{s2} = \frac{2 \cdot 48,4}{1,76/2}$$

$$a_{s1} = 115,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \qquad a_{s2} = 110 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

➤ výpočet pro provzdušněnou nádrž a maximální otáčky čerpadla:

- přesná hodnota periody pro tlaky p_1 a p_2 :

$$t_{p1} = t_2 - t_1 \qquad t_{p2} = t_2 - t_1$$

$$t_{p1} = 5,87 - 5,08 \qquad t_{p2} = 5,38 - 4,79$$

$$t_{p1} = 0,79 \text{ s} \qquad t_{p2} = 0,59 \text{ s}$$

- rychlost tlakové vlny a_s :

- délka potrubí $l = 48,4\text{m}$

$$a_{s1} = \frac{2 \cdot l}{t_p/2} \qquad a_{s2} = \frac{2 \cdot l}{t_p/2}$$

$$a_{s1} = \frac{2 \cdot 48,4}{0,79/2} \qquad a_{s2} = \frac{2 \cdot 48,4}{0,59/2}$$

$$a_{s1} = 245 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \qquad a_{s2} = 328,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

➤ tabulka vypočtených hodnot pro všechny otáčky čerpadla:

	odstátá nádrž		provzdušněná nádrž	
	t_p	a_s	t_p	a_s
	[s]	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	[s]	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
	Maximální otáčky			
1	1,68	115	0,79	245
2	1,76	110	0,59	328
	Střední otáčky			
1	1,73	112	0,47	412
2	1,73	112	0,66	293
	Minimální otáčky			
1	1,64	118	0,9	215
2	1,69	114	0,9	215

Tab. 5.1 vypočtené hodnoty pro všechny otáčky čerpadla

6 ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byla popsána definice hydraulického rázu a jeho následné využití, dále byl vysvětlen princip funkce elektrochemické a optické měřicí sondy pro měření množství vzduchu obsaženého v kapalině.

Cílem bakalářské práce bylo určit, jak se změní průběhy tlaků při hydraulickém rázu u kapaliny o různém obsahu vzduchu, jehož množství mělo být snímáno elektrochemickou a optickou sondou pro měření obsahu vzduchu. Jelikož elektrochemická sonda pro snímání obsahu vzduchu, kterou vyrábí VŠB - Technická univerzita Ostrava, nebyla doposud zcela dokončena a u objednané optické sondy se zpozdil termín dodání, bylo laboratorní měření provedeno bez přesného určení obsahu vzduchu. Měření při jednotlivých otáčkách bylo vždy provedeno pro dva způsoby měření, kde byl malý obsah vzduchu v odstáté nádrži a velký obsah vzduchu v nádrži provzdušněné. Průběhy tlaků byly zaznamenávány z tlakových snímačů do počítačového programu Matlab - Simulink, z kterého jsem naměřené hodnoty zkopíroval do programu Microsoft - Excel, kde jsem vytvořil příslušné grafy.

Z grafů je patrné, že jsou maxima průběhů tlaků v provzdušněné nádrži menší oproti odstáté nádrži, což je způsobeno tím, že vzduch má menší hodnotu modulu objemové pružnosti než voda a směs také. V odstáté nádrži jsou průběhy tlaků provázeny větší časovou periodou oproti provzdušněné nádrži, kde jsou průběhy tlaků o vyšší frekvenci při menší časové periodě. Výpočtem bylo zjištěno, že rychlost tlakové vlny v provzdušněné nádrži je větší než rychlost tlakové vlny v odstáté nádrži. Výpočty rychlostí tlakových vln jsou pouze orientační, jelikož odečítání časové periody z grafů je obtížné.

Patřičná část bakalářské práce byla věnována renovaci bývalé měřicí trati, kde byly nahrazeny starší rezavějící části novými plastovými, aby bylo docíleno nejpresnějších hodnot z měřících snímačů.

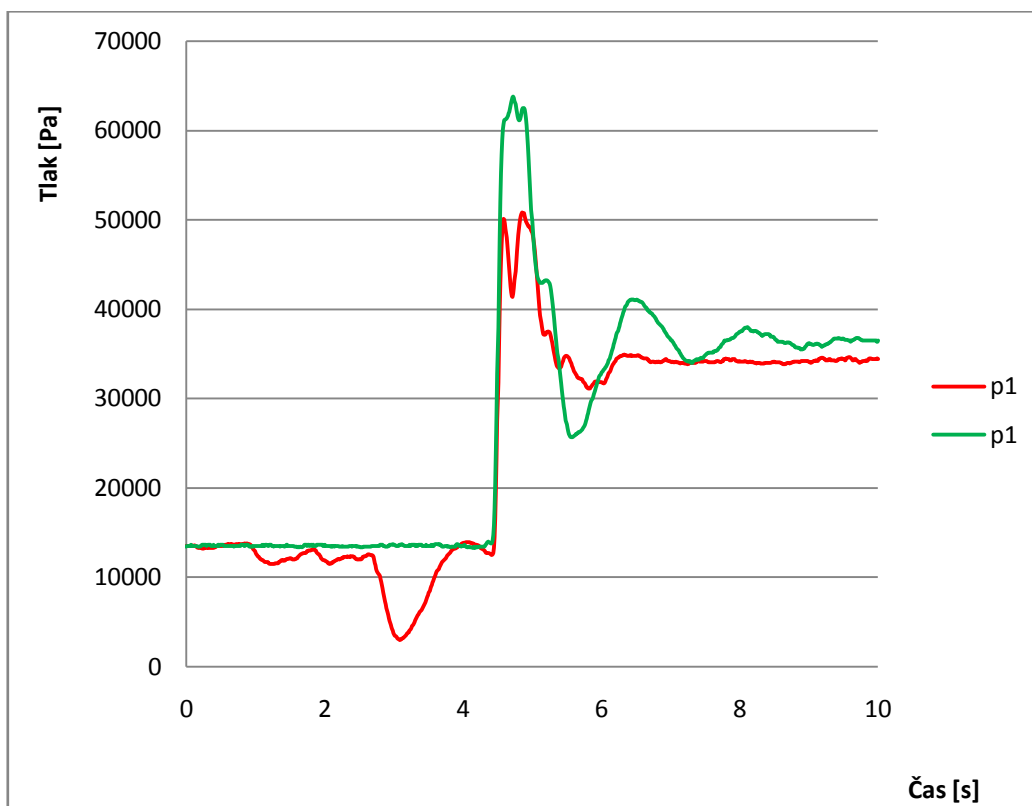
7 LITERATURA

- [1] DRÁBKOVÁ, S., KOZUBKOVÁ, M. *Cvičení z mechaniky tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2002.
- [2] Tlakový ráz v hydraulickém systému bazénů
<http://www.astralpool.cz/podpora/Tlakovyraz.pdf>
- [3] DRÁPKOVÁ, S. aj. *Mechanika tekutin-učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [4] Physics of Water Hammer in plastic pipe
http://www.siouxchief.com/Resource_/ProductMedia/205/Water%20Hammer%20in%20Plastic%20Pipe.wmv
- [5] Vodní trkač
<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/trkac.htm>
- [6] ULRICH, E. *Hydromechanika*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2001.
- [7] KOZUBKOVÁ, M. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [8] KOPÁČEK, J. Vzduch v minerálním oleji a jeho měření. In *Strojírenství*, 36, 1986, čís. 11, s. 656-662.
- [9] Novinky v technice Coriolisových průtokoměrů
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31176
- [10] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2009.
- [11] Elektrochemické snímače a převodníky – přehled trhu
<http://www.automatizace.cz/article.php?a=598>
- [12] Měření rozpuštěného kyslíku v kapalinách
<http://www.endress.cz/>
- [13] Nová revoluční metoda měření rozpuštěného kyslíku pro nápojový průmysl
http://www.regom.cz/images/FCKeditor/File/Knihovnapdf/KP_80_81_Regom_A4.pdf
- [14] Bezúdržbové optické měření rozpuštěného kyslíku fluorescenční metodou
<http://www.schulzep.cz/>

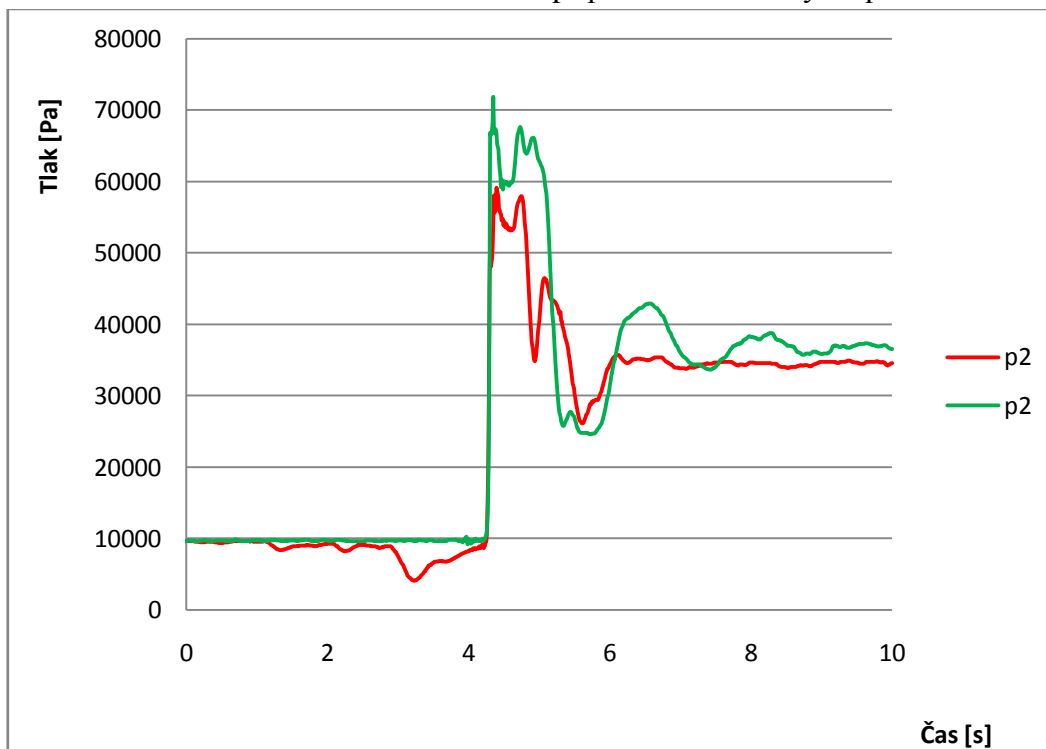
- [15] Optické měření koncentrace kyslíku ve vodách
http://www.hachlange.cz/countrysites/action_q/download%3Bdocument/DOK_ID/14781862/type/pdf/lkz/CZ/spkz/cs/TOKEN/hzNKW-hWGO5vzuFIKwuQmXanr70/M/vN8AvQ
- [16] Nové optické senzory množství rozpuštěného kyslíku
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36346.pdf>
- [17] Optické měření kyslíku rozpuštěného ve vodě
<http://www.automatizace.cz/article.php?a=928>
- [18] Dissolved Oxygen Measurement
<https://portal.endress.com/wa001/dla/50000006574/000/01/FA010-E.pdf>
- [19] Pumpa e-shop a.s.
<http://obchod.pumpa.cz/zbozi/174-wilo-star-rs-25-4-230v-obehove-cerpadlo-180mm>
- [20] KOZUBKOVÁ M. aj. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní měření*. VŠB-TU Ostrava, 2007.

PŘÍLOHA

➤ porovnání průběhu tlaků pro střední otáčky čerpadla:

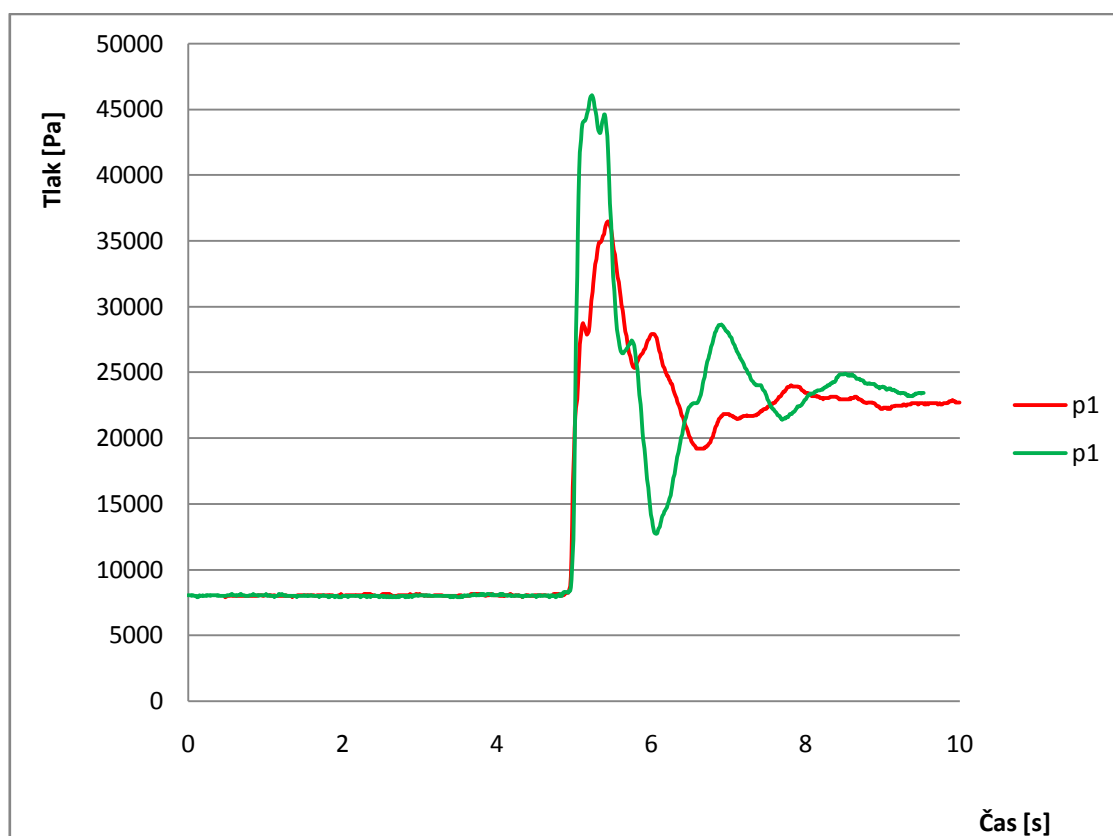


P.1. Porovnání tlaků p_1 pro střední otáčky čerpadla

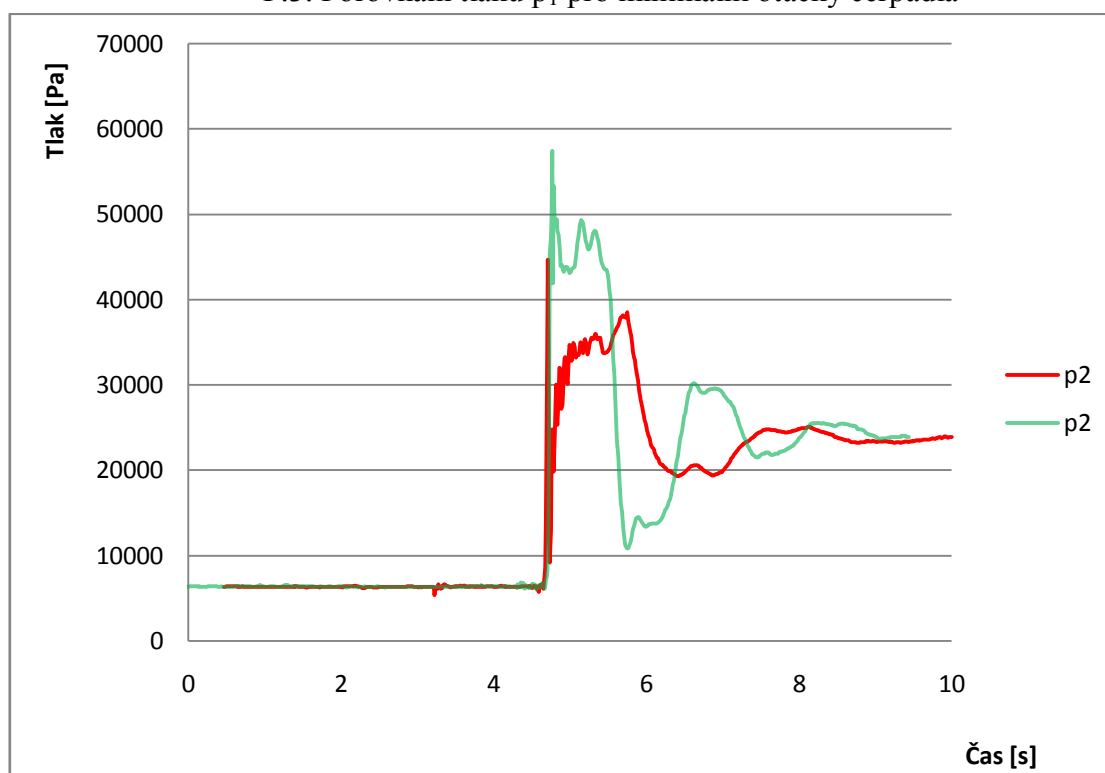


P.2. Porovnání tlaků p_2 pro střední otáčky čerpadla

➤ porovnání průběhu tlaků pro minimální otáčky čerpadla:

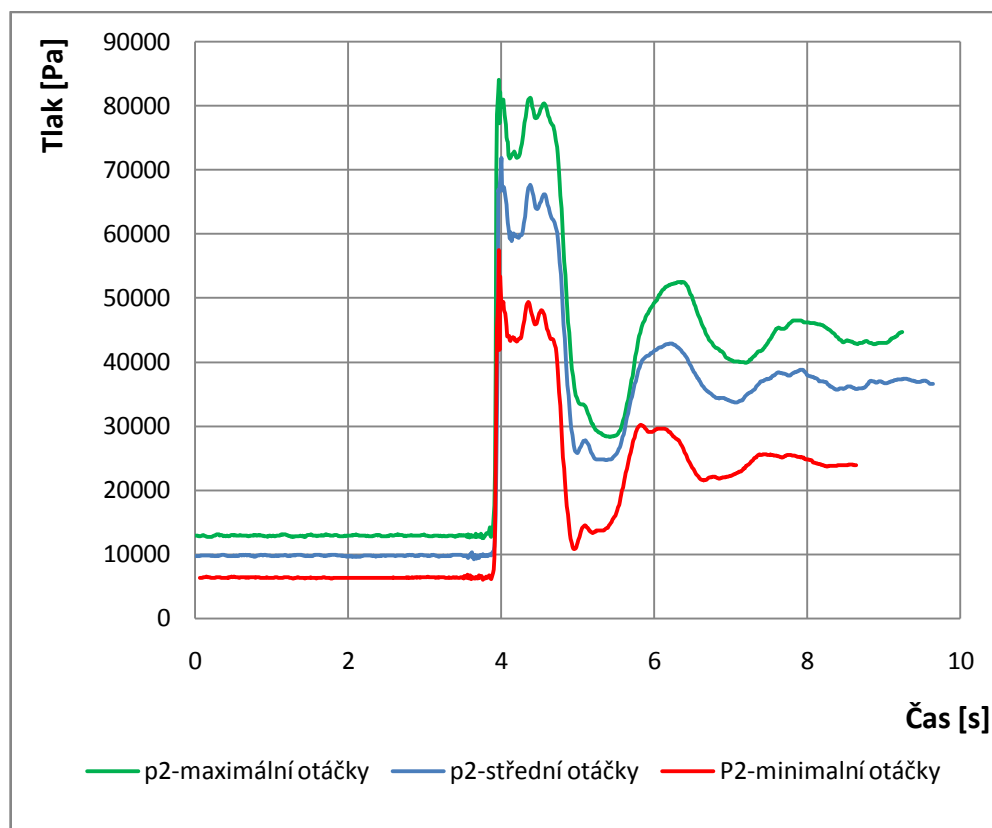


P.3. Porovnání tlaků p_1 pro minimální otáčky čerpadla

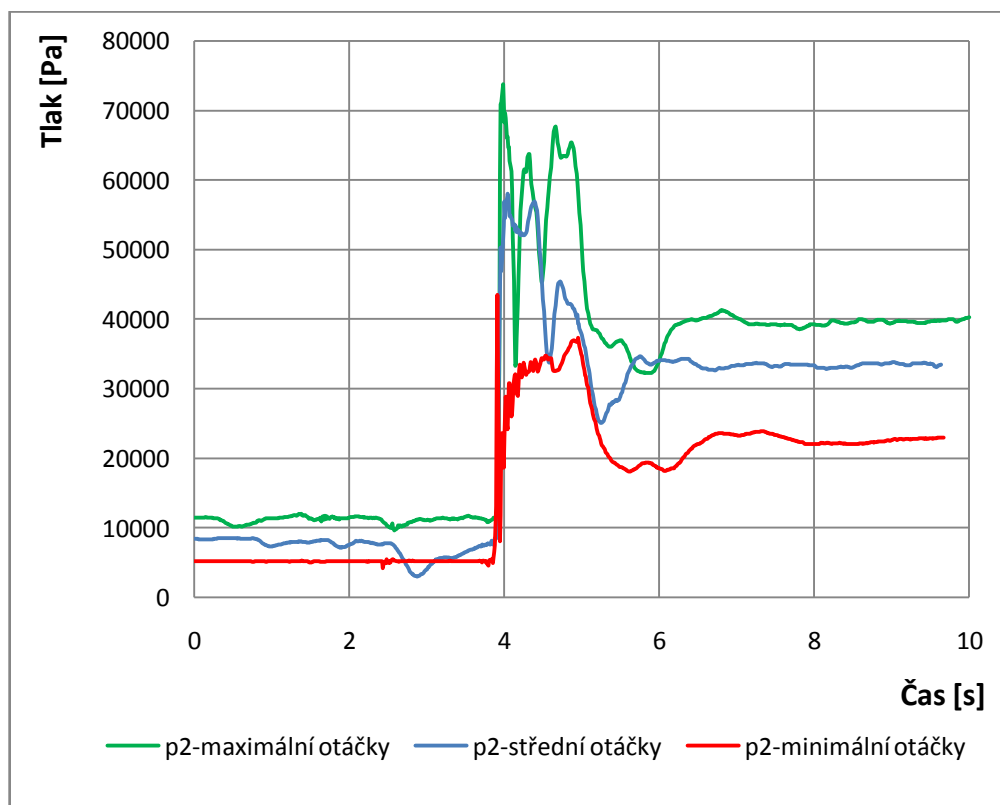


P.4. Porovnání tlaků p_1 pro minimální otáčky čerpadla

- porovnání průběhu tlaků p_2 pro všechny otáčky čerpadla



P.5. Porovnání tlaků p_2 pro všechny otáčky čerpadla – odstátá nádrž



P.6. Porovnání tlaků p_2 pro všechny otáčky čerpadla – provzdušněná nádrž